RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

Cerema

Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie

Collection | **Références**

Collection | **Références**

Guide méthodologique

Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun
Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex

L'ouvrage est une œuvre collective réalisée sous la direction du Cerema.

Groupe de rédaction :
- Clément BONIFAS (DIR Est)
- Anne-Sophie COLAS (Université Gustave Eiffel)
- Florent PLASSARD (Cerema Centre-Est)
- Nicolas ROUXEL (Cerema Ouest)
- Laurent LLOP (Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux)
- Sabrina PERLO (Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux)

Groupe de relecture :
- Bruno BERENGER (Cerema Méditerranée)
- Véronique BICILLI (DIR Massif Central)
- Cécile BOUVET (Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux)
- Pierre CORFDIR (Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux)
- Bernard JACQUIER (Ex Cerema Centre-Est)
- Laura KERNER (Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux)
- Frédéric MARTY (DIR Méditerranée)
- Bruno VION (Cerema Méditerranée)

Groupe de testeurs :
- Clément BONIFAS (DIR Est)
- Pierre CHAMBON (Cerema Centre-Est)
- Frédéric MARTY (DIR Méditerranée)

Coordination :
- Sabrina PERLO (Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux)

Crédits photos :
- Le réseau des DIR et le Cerema

Dessins :
- Denis Cousin (Cerema Infrastructures de Transport et Matériaux)

Comment citer cet ouvrage :
Cerema. *Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie*
Bron : Cerema, 2020. Collection : Références. ISBN : 978-2-37180-454-8

Sommaire

Avant-propos 5

Chapitre 1 - Présentation de la méthodologie de l'Analyse des Risques 7
1.1 - L'analyse des risques selon la méthodologie du Sétra 7
1.2 - Champs d'application de la démarche 11
1.3 - Références et textes en interaction avec cette démarche 12

Chapitre 2 - Étape 1 : Définition de l'objectif de l'Analyse des Risques 13
2.1 - Le patrimoine des murs en maçonnerie (Types 1 et 2) 13
2.2 - Analyse des risques comme outil de la gestion du risque 14

Chapitre 3 - Étape 2 : Définition du système de l'Analyse des Risques 15
3.1 - Terminologie – Dimensions courantes – Morphologie 15
3.2 - Matériaux constitutifs 18
3.3 - Mode de rupture des murs maçonnés (Types 1 et 2) 19
3.4 - Notions sur les causes et la nature des désordres 22

Chapitre 4 - Étape 3.1 : Identification des aléas 28
4.1 - Aléa « Agressivité du milieu » 28
4.2 - Aléa « Augmentation des sollicitations sur le mur » 32
A.3 - Aléa « Résistance géotechnique en pied défaillante » 38

Chapitre 5 - Étape 3.2 : Vulnérabilité aux aléas 41
5.1 - Vulnérabilité à l'« Agressivité du milieu » 41
5.2 - Vulnérabilité à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur » 43
5.3 - Vulnérabilité à la « Résistance géotechnique en pied défaillante » 45

Chapitre 6 - Étape 3.3 : Gravité des conséquences 47
6.1 - L'importance de l'itinéraire concerné par le mur 47
6.2 - L'importance du trafic 47
6.3 - L'importance patrimoniale de l'ouvrage 48
6.4 - L'impact sur le niveau de service 48
6.5 - Évaluation du niveau de conséquences 49

Chapitre 7 - Étape 3.4 : Évaluation du niveau de risque 50
7.1 - Évaluation du niveau des aléas globaux 50
7.2 - Évaluation du niveau des vulnérabilités globales 51
7.3 - Évaluation du niveau de criticité 52
7.4 - Évaluation du niveau de gravité des conséquences 54
7.5 - Évaluation du niveau du risque 54

Chapitre 8 - Éléments de traitement des risques 55
8.1 - Sélection des risques 55
8.2 - Traitement du risque 58

Annexes 66

Annexe 1 - Les matériaux constitutifs 66

Annexe 2 - Les différentes sollicitations pour les murs de soutènement en maçonnerie 68

Annexe 3 - Fiche d'évaluation du niveau de risque 70

Notations et symboles utilisés 71

Bibliographie 72

Glossaire 74

Avant-propos

L'objet de ce guide est de présenter une **méthodologie d'Analyse des risques appliquée aux murs de soutènement en maçonnerie, sèche ou jointoyée**.

Ces ouvrages représentent plus de la moitié des murs de soutènement du réseau routier national non concédé. Ils représentent donc un enjeu fort pour les gestionnaires. Ces derniers disposent généralement de peu d'informations sur ces ouvrages souvent très anciens. Il est par ailleurs difficile de les justifier réglementairement par les méthodes de calcul modernes. D'autre part, la gestion des ouvrages de soutènement de ce type a mis en évidence le fait que la seule surveillance des désordres visibles ne permettait pas toujours de détecter certaines pathologies qui les affectent, mettant en cause leur solidité et leur stabilité. En effet, des ouvrages présentant d'importantes déformations peuvent néanmoins « résister » pendant des années, alors que d'autres s'effondrent sans signe avant-coureur en raison, par exemple, d'une défaillance de fondation. Enfin, ces ouvrages se trouvant souvent en zone montagneuse, il est difficile de proposer des itinéraires de déviation en cas de défaillance. Cette analyse des risques simplifiée a donc toute son utilité dans la gestion de ce type d'ouvrages.

Cette analyse des risques permet aux **gestionnaires** de compléter leur connaissance de leur patrimoine et de son état, par une caractérisation méthodique de l'éventualité d'une ruine pour chacun des ouvrages et des conséquences qui en résulteraient. Cette information a vocation à être exploitée, en particulier, afin de mieux identifier les ouvrages les plus préoccupants, et afin d'établir et hiérarchiser une planification des actions de surveillance et d'entretien plus efficaces.

Cette **démarche d'analyse des risques** est établie selon la méthode générale de maîtrise des risques développée pour les ouvrages d'art et décrite dans le guide du Sétra [1]. Elle s'applique notamment :

- aux catégories d'ouvrages dits sensibles ;
- à des ouvrages soumis à un risque spécifique (séisme, affouillement).

Elle a ainsi donné lieu à la parution de plusieurs guides : VIPP [2], Terre Armée® [3], buses métalliques [4], tranchées couvertes et tunnels creusés [5], murs de soutènement en béton armé sur semelle [6], affouillement [7]. Elle a vocation à être régulièrement étendue à de nouvelles catégories d'ouvrages (murs de soutènement en gabions, pont en maçonnerie [8], ponts mixtes...).

La méthodologie décrite dans ce guide est principalement destinée aux murs de soutènement en maçonnerie situés sur le réseau routier national non concédé de l'État. Elle s'appuie en particulier sur les méthodologies et instructions en vigueur pour les ouvrages d'art de l'État. Elle peut néanmoins être appliquée au patrimoine d'autres maîtres d'ouvrages, comme les collectivités territoriales ou les exploitants autoroutiers, moyennant quelques adaptations.

L'ensemble des scénarios de ruine, qu'ils soient d'origines géotechniques ou structurales, est traité dans ce guide, à l'exception du phénomène de grand glissement (Figure 3).

Chapitre 1

Présentation de la méthodologie de l'Analyse des Risques

Ce document comprend 8 chapitres correspondant aux différentes étapes de la maîtrise des risques selon la méthodologie du Sétra [1] :

- **le chapitre 1** expose le principe de la méthodologie de l'analyse des risques selon la méthodologie du Sétra, qui est appliqué aux murs en maçonnerie dans les chapitres 4 à 6 ;
- **le chapitre 2** présente le patrimoine d'ouvrages pris en compte et l'intérêt de l'analyse des risques pour le gestionnaire (étape 1 de l'analyse des risques) ;
- **le chapitre 3** définit le système, c'est-à-dire l'ouvrage et son environnement (étape 2 de l'analyse des risques) ;
- **les chapitres 4 à 6** relatifs à l'analyse dite simplifiée couvrent respectivement l'identification des aléas, l'évaluation simplifiée de la vulnérabilité aux aléas et l'importance des conséquences (les 3 premières parties de l'étape 3 de l'analyse des risques) ;
- **le chapitre 7** traite l'évaluation du niveau de risque (la dernière partie de l'étape 3 de l'analyse des risques) ;
- **le chapitre 8** fournit quelques éléments d'analyse détaillée et de traitement du risque (les étapes 4 à 6 de l'analyse des risques).

1.1 - L'analyse des risques selon la méthodologie du Sétra

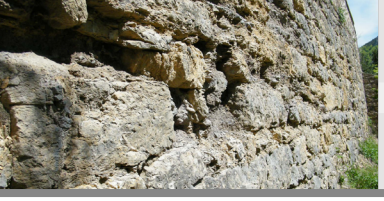
Dans cette partie sont présentés la méthodologie d'analyse des risques, son principe d'application et les composantes du risque (aléa, vulnérabilité et gravité des conséquences).

1.1.1 - Explication de la méthodologie

L'analyse des risques selon la méthodologie du Sétra [1] aide à la gestion des ouvrages du patrimoine en évaluant les composantes du risque que sont les aléas, la vulnérabilité de la structure à ces derniers, les conséquences d'une défaillance et en déterminant un niveau de risque par rapport à une défaillance envisageable.

Elle **[1]** comporte deux niveaux d'analyse (Figure 1) :

- **une analyse simplifiée** – principalement qualitative – rapide et économique, car établie à partir des recensements et visites IQOA (exclusivement visuelles) et d'autres données obtenues sans investigations supplémentaires. Cette analyse permet de classer les ouvrages selon 3 niveaux de risque : fort, moyen, faible ;
- **une analyse détaillée**, généralement optionnelle – semi-quantitative ou quantitative – réclamant des investigations complémentaires (*cf.* § 8.2.2), comme des prélèvements, des sondages, des essais et le recours à un personnel plus qualifié. Cette analyse est requise lorsque l'analyse simplifiée aboutit à un risque fort et lorsque ce dernier s'est révélé difficile à évaluer qualitativement (approche sécuritaire).



Dans le cas le plus général, les informations à disposition du gestionnaire et les résultats de l'analyse simplifiée permettent de démarrer un processus opérationnel en vue de réduire le niveau de risque (étude, investigations, diagnostic, travaux éventuels).

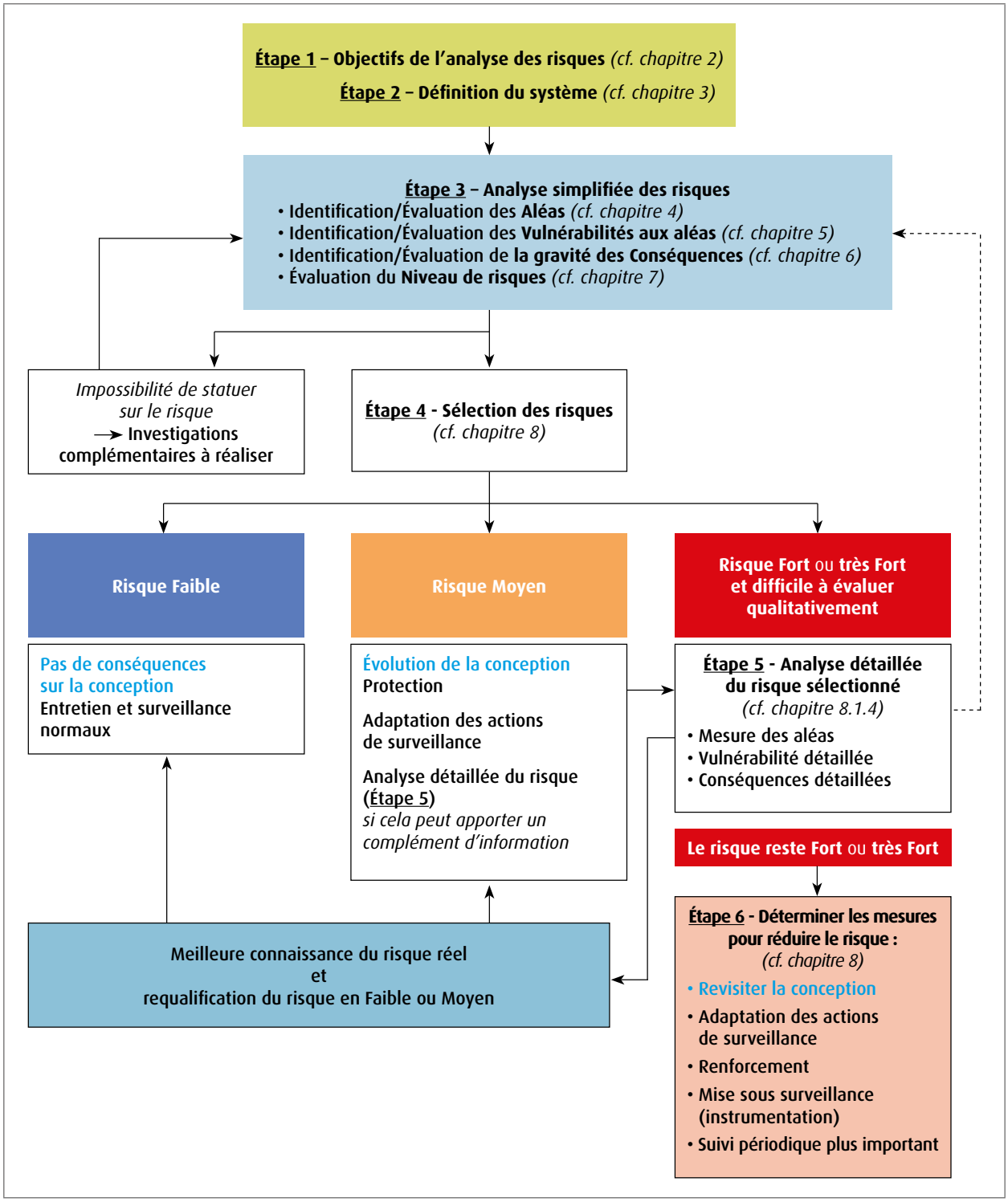
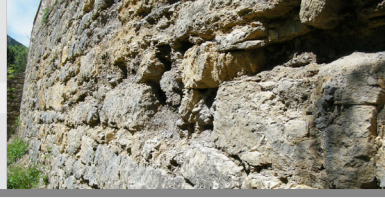


Figure 1 : Organigramme de la méthodologie générale[1] d'analyse des risques
(en bleu, les indications relatives à la gestion du risque avant la réalisation de l'ouvrage, la flèche en pointillé indique qu'une fois l'analyse détaillée réalisée, les informations ainsi récoltées doivent être réutilisées pour compléter les données de la prochaine analyse des risques simplifiée réalisée sur l'ouvrage concerné)

1 Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art. Sétra, 2013, 92 p. [1].



Dans ce guide d'analyse des risques simplifiée appliquée aux murs en maçonnerie :

- **l'analyse simplifiée** permet de déterminer le niveau de risque maximal avec une fiabilité suffisante, tout en disposant d'une mise en œuvre aisée et financièrement supportable (examen visuel, dont les visites IQOA et la connaissance des processus à l'origine des pathologies). Elle constitue un outil supplémentaire pour l'aide à la décision des gestionnaires de patrimoine d'ouvrages d'art en complément des dispositions réglementaires pour l'État découlant de l'ITSEOA Fascicule 0 (actions de surveillance et d'évaluation de l'état des ouvrages) [9]. Cette analyse simplifiée est proposée dans le cas des murs en maçonnerie selon :
  - une « Procédure rapide », c'est-à-dire réalisée à partir des éléments facilement disponibles,
  - une « Procédure plus longue », si nécessaire (§ 7.1), nécessitant par exemple la recherche et la consultation du dossier d'ouvrage ou d'archives sur les modes constructifs usuels dans la zone et la période concernée par l'ouvrage[2].
- **l'analyse détaillée,** particulièrement adaptée dans le cas de risques difficilement évaluables par l'analyse simplifiée, sort du cadre de ce guide. Le lecteur pourra trouver sa présentation dans le guide méthodologique du Sétra [1] et quelques éléments d'investigations dans le § 8.2.2.

IQOA (**I**mage **Q**ualité des **O**uvrages d'**A**rt) et **ITSEOA** (**I**nstruction **T**echnique pour la **S**urveillance et l'**E**ntretien des **O**uvrages d'**A**rt)

L'**IQOA** est un outil s'inscrivant dans le processus d'évaluation périodique de l'état des ouvrages. Il est intégré dans l'**ITSEOA** qui prévoit diverses modalités de surveillance des ouvrages. Cette méthode permet d'inventorier, de classer et d'évaluer l'état apparent des différentes parties d'un ouvrage et d'attribuer une classe d'état ne prenant en compte que les aspects techniques (défauts, désordres affectant éventuellement l'ouvrage). L'**IQOA** s'appuie sur des procès-verbaux types où sont consignés les résultats de la visite d'un ouvrage, dont les défauts constatés selon des catalogues de désordres [10] et [11].

Il faut noter que l'IQOA reste un élément dans la démarche de diagnostic d'un ouvrage pathologique et n'est en aucun cas un diagnostic.

Pour la méthode IQOA, on désigne les murs poids en maçonnerie par « **murs de Type 1** » pour les murs de pierres sèches et « **murs de Type 2** » pour les murs jointoyés.

La finalité de cette analyse des risques n'est pas de fournir des informations sur l'état apparent d'un mur, ce qui reste l'objectif de l'IQOA ou des méthodes similaires, mais sur les risques présents sur l'ouvrage en service et sur la sécurité des usagers de la route. En tant qu'outil d'aide à la décision et de priorisation selon un niveau de risque, il s'agit d'une démarche qui s'applique à un patrimoine connu, inventorié et évalué[3] par le gestionnaire. Ainsi, il est possible :

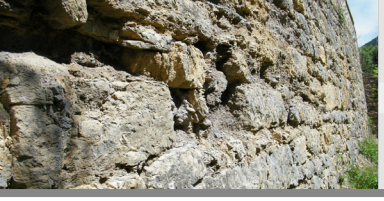
- **qu'un ouvrage présentant des désordres apparents importants** (lors d'une visite IQOA par exemple) ne soit pas systématiquement classé en risque fort ;
- **qu'un ouvrage classé en risque faible** ne soit pas nécessairement en bon état apparent (notamment suivant la méthodologie IQOA).

Cette méthode d'aide à la décision peut permettre d'optimiser les politiques de gestion et ainsi de minimiser les coûts en demeurant sécuritaire vis-à-vis des usagers si et seulement si :

- **la base de données IQOA** est à jour afin d'assurer son exploitabilité ;
- **l'analyse simplifiée** est renouvelée afin de garantir la fiabilité des résultats en tenant compte de l'évolution des indicateurs.

2 En cas d'insuffisance ou d'absence d'informations dans le dossier d'ouvrage, il peut être instructif de se référer à des dossiers d'ouvrages similaires et réalisés dans la même période.

3 Selon la méthodologie IQOA ou équivalent.



1.1.2 - Principe d'application et étapes de la méthodologie

L'analyse des risques appliquée aux ouvrages d'art selon la méthodologie du Sétra [1] se décompose en six étapes dont la Figure 1 présente l'organisation :

- **Etape 1** : Définition de l'objectif de l'étude ;
- **Etape 2** : Définition du système ;
- **Etape 3** : Analyse des risques simplifiée, constituée de :
  - Etape 3.1 : l'identification et l'évaluation simplifiée des aléas,
  - Etape 3.2 : l'évaluation simplifiée de la vulnérabilité aux aléas,
  - Etape 3.3 : l'évaluation simplifiée de l'importance des conséquences,
  - Etape 3.4 : l'evaluation du risque à l'aide de matrices de risques.
- **Etape 4** : Sélection des risques ;
- **Etape 5** : Analyse détaillée ;
- **Etape 6** : Traitement du risque.

Dans ce guide traitant de l'analyse des risques pour les murs de soutènement en maçonnerie :

- seules les **étapes 1 à 3** sont détaillées ;
- **l'étape 4** qui traite de la sélection des risques en s'appuyant sur le niveau de risque obtenu par l'analyse simplifiée (**étape 3**) n'est que brièvement décrite sur la Figure 1 et de manière plus détaillée dans le chapitre 8 (Figure 23) ;
- **l'étape 5** qui fait référence à l'analyse détaillée consistant à mieux quantifier les aléas, les vulnérabilités, les conséquences est succinctement présentée dans le § 8.1.4 ;
- **l'étape 6** relative au traitement du risque est partiellement abordée dans le § 8.

1.1.3 - Les composantes du risque : aléa, vulnérabilité et gravité des conséquences

Les trois composantes de l'analyse des risques à évaluer et à renseigner sont l'**aléa**, la **vulnérabilité** et la **gravité des conséquences**, appelée aussi l'enjeu (Figure 1). Ces trois notions sont décomposées en facteurs eux-mêmes définis selon des critères.

La combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité caractérise la probabilité de défaillance appelée **criticité de la structure**. La détermination du niveau de risque permettant l'établissement d'une stratégie de surveillance et de réparation par le gestionnaire s'obtient en croisant la criticité d'un ouvrage avec la gravité des conséquences.

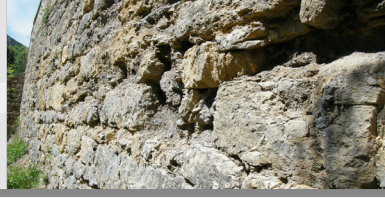
L'aléa

L'aléa est le **phénomène qui est à l'origine du risque**, qui peut se produire ou non au cours de la vie de n'importe quel ouvrage. Il est incertain et caractérisé par sa probabilité d'occurrence pendant une période de référence ainsi que par l'intensité de sa manifestation. Il peut être de nature diverse :

- **interne de causes exogènes** (altération des matériaux, actions de l'eau...) ;
- **interne de causes endogènes** (matériaux défectueux, conception défaillante...) ;
- **externe d'origine naturelle** (séisme, mouvements de terrain...) ;
- **externe d'origine humaine** (incendie, surcharges exceptionnelles, chocs...).

La vulnérabilité

La vulnérabilité est la capacité de l'ouvrage, vu son état et sa conception, à résister à un ou plusieurs aléas.



La gravité des conséquences

Il s'agit de s'intéresser aux conséquences possibles d'une défaillance (perte d'aptitude au service de l'infrastructure, effondrement de tout ou partie de la structure et/ou mise en danger des usagers) en termes de **vies humaines**, **de coûts de réparation**, **de perturbations économiques et sociales** occasionnées par la perte d'exploitation ou encore d'atteintes à l'environnement. Cette réflexion socio-économique doit être menée **localement et à l'échelle de l'itinéraire concerné**. La **gravité des conséquences** dépend également de critères socio-économiques évalués par le gestionnaire, comme le trafic routier à proximité de l'ouvrage et notamment le pourcentage de poids lourds, la possibilité de mettre en place des itinéraires alternatifs (donc directement associé à l'impact socio-économique), ou encore la taille de l'ouvrage et le coût des travaux de remise en service.

Combinaison des facteurs du risque, les scénarios

La combinaison des aléas, de la vulnérabilité et de la gravité des conséquences, selon un scénario prédéfini (exemple de la Figure 2), donne alors un niveau de risque. Les gestionnaires disposent de ce dernier pour chaque scénario et d'un niveau global pour leur ouvrage...
On définit dans ce guide quatre niveaux de risque : faible, moyen, fort et très fort.

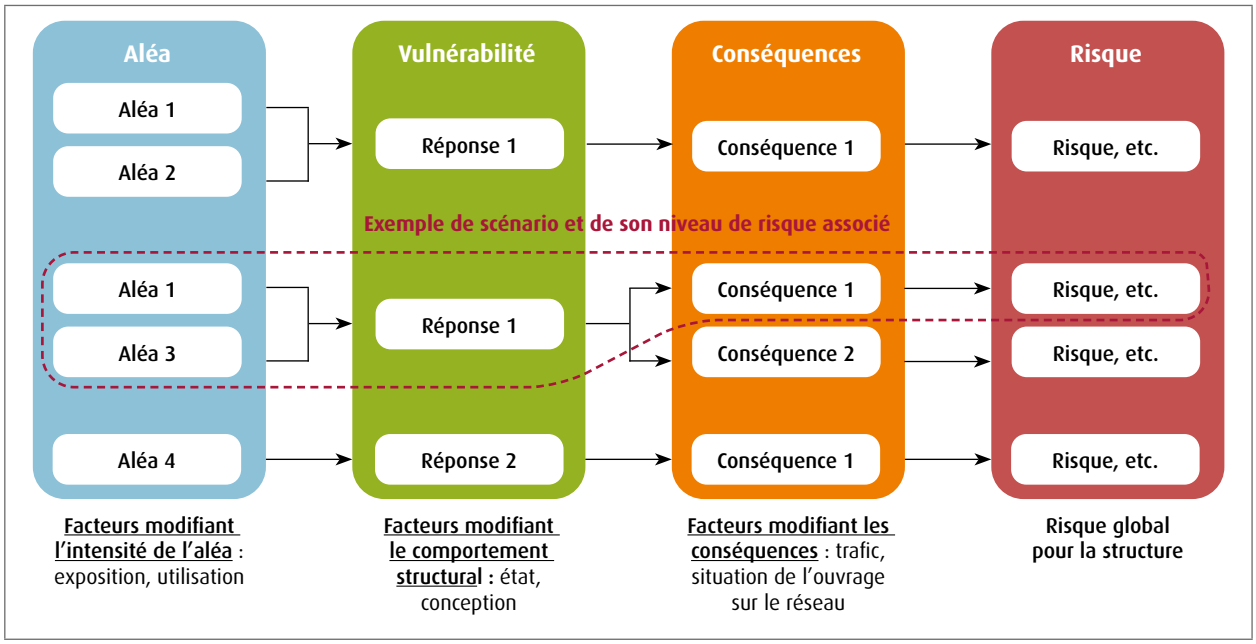


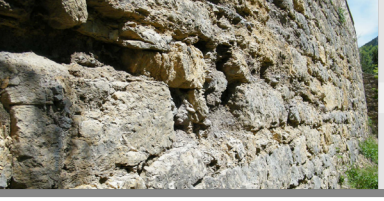
Figure 2 : Exemples de scénarios et détermination du niveau de risque (inspiré de [1])

1.2 - Champs d'application de la démarche

La méthodologie décrite dans le présent guide est destinée aux services gestionnaires de **murs de soutènement en maçonnerie fonctionnant en mur poids**.

Sont exclus du périmètre d'application de ce guide :

- **les talus raidis et les perrés** (*cf.* § 3.1), car ils ne fonctionnent pas comme un mur poids ;
- **les murs de culée** (porteurs ou non), qu'il s'agisse de murs de front ou de murs en aile ou en retour. Les murs de dimensions courantes sont traités dans le guide d'analyse des risques de ponts en maçonnerie [8], quant à ceux de dimensions exceptionnelles, le gestionnaire peut s'inspirer de la présente méthode d'analyse ;
- **les ouvrages ayant fait l'objet de réparations** impliquant un changement dans le fonctionnement du mur (par exemple la mise en œuvre de tirants ou de placages) ;
- **les ouvrages constitués de blocs** naturels (enrochement) ou artificiels (en béton), qui d'ailleurs n'entrent pas dans les soutènements de Types 1 ou 2 selon la méthode IQOA.



Le risque vis-à-vis du **glissement d'ensemble** (Figure 3) n'est pas traité par la présente analyse des risques simplifiée, car ce dernier est indépendant de la nature ou de l'état de l'ouvrage. Au-delà de la zone d'influence, nous invitons le gestionnaire à regarder des signes de mouvements de terrain étendus (dommages au niveau des constructions existantes, moutonnements, fissures des terrains non centrées sur le mur...) et de consulter des bases de données[4] des mouvements de terrains.

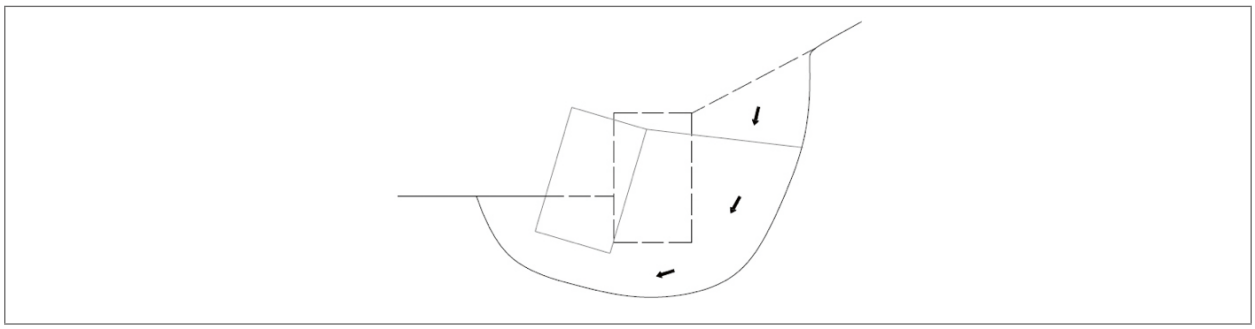


Figure 3 : Glissement d'ensemble d'un mur poids

1.3 - Références et textes en interaction avec cette démarche

La démarche d'analyse de risques s'ajoute aux **actions de surveillance et d'entretien de l'ITSEOA**.

Concernant la **gestion du risque**, la méthode fait référence aux documents suivants :

- Maîtrise des risques – Application aux ouvrages d'art, Sétra, 2013 [1] ;
- IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) – Murs, Murs de soutènement, Guide méthodologique, Sétra, 2005 [10] ;
- IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) – Murs, Murs de soutènement, Murs poids en maçonnerie, Types 1 et 2, Catalogue des désordres et procés verbal de visite, Cerema, 2018 [11] ;
- IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) – Murs, La quantification des désordres, Cerema, février 2018 [12] ;
- ITSEOA (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages) Fascicule 0 – Dispositions générales applicables à tous les ouvrages, Sétra, décembre 2010 [9] ;
- ITSEOA (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages) Fascicule 51 – Ouvrages de soutènement, Sétra, 2010 [13] ;
- ITSEOA (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art) Fascicule 2 – Généralités sur la surveillance, Sétra, décembre 2010 [14] ;
- ITSEOA (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages) Fascicule 3 – Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde, Sétra, décembre 2010 [15] ;
- Les ouvrages de soutènement – Guide de conception générale, Sétra, 1998 [16].

4 Bases de données internes ou auprès du site du BRGM – http://infoterre.brgm.fr/mouvements-de-terrain, ou par consultation des cartes géologiques.

Chapitre 2

Étape 1 : Définition de l'objectif de l'Analyse des Risques

2.1 - Le patrimoine des murs en maçonnerie (Types 1 et 2)

Les murs de soutènement ont été construits pour soutenir ou protéger les voiries. Sur les réseaux routiers anciens, datant d'avant le XX^{e} siècle, les techniques de construction d'ouvrage utilisaient surtout la maçonnerie. Avec l'arrivée de techniques, de méthodes et de moyens de calculs pouvant répondre plus efficacement aux contraintes imposées par des **terrains à forte pente (ou versants)**, en particulier dans le cas de zones sismiques (ouvrages complexes à parois clouées ou tirants précontraints), de nouvelles typologies d'ouvrages d'art sont apparues.

Le patrimoine des murs en maçonnerie reste le plus ancien avec des ouvrages qui par ailleurs présentent la plupart du temps des **durées de vie remarquables**.

Les murs poids représentent le type de soutènement le plus important en nombre d'ouvrages d'art. Dans cette famille d'ouvrages, les murs en maçonnerie de pierres sèches (Type 1) représentent en nombre environ 15,7 % des murs du réseau non concédé de l'Etat et ceux en maçonnerie jointoyée, 38 % (chiffres issus de la campagne IQOA de 2017 et publiée en 2018).

Ils représentent donc **un enjeu fort pour les gestionnaires** compte tenu de :

- l'absence fréquente **des plans d'origine et du dossier d'ouvrage** exécuté ou dossier de recollement (Note 1) ;
- l'impossibilité éventuelle (Note 2) de les justifier complètement par les **règlements de calculs modernes** (augmentation des charges routières, évolution des cartes sismiques...) ;
- la difficulté de trouver des **itinéraires de déviation** en zone montagneuse en cas de coupure de la voie ;
- la difficulté de **prévoir la ruine de l'ouvrage**, celui-ci pouvant tout à fait :
  - présenter des déformations importantes et inquiétantes et pourtant tenir des années,
  - subir un effondrement soudain par une défaillance de sa fondation difficilement prévisible.

Note 1 : Les dossiers d'ouvrage des murs en maçonnerie sont le plus souvent inexistants.

Note 2 : L'impossibilité est généralement due à l'absence des données géométriques de la section des murs à utiliser pour les calculs.

Lors des effondrements de ce type de mur (Figure 4), leur géométrie d'origine s'est parfois révélée bien différente de celle couramment utilisée et présentée par la suite (§ 3.1 « Morphologie – Terminologie – Dimensions courantes ») en raison notamment de la difficulté pour les constructeurs de l'époque d'obtenir des largeurs d'assise conformes aux principes généraux (de l'ordre de 1/3 de la hauteur du mur).

Figure 4 : Exemples de rupture de mur en maçonnerie

2.2 - Analyse des risques comme outil de la gestion du risque

L'analyse des risques, par la classification des ouvrages selon leur niveau de risque (Note), participe à ce que les gestionnaires :

- évaluent l'aptitude de l'ouvrage au service en fonction de l'évolution des besoins et de l'environnement ;
- affectent de manière ordonnancée les moyens financiers et humains en complément des outils classiques de gestion de patrimoine.

Note : En raison des différences de constitution des murs de Type 1 (de pierres sèches) et de Type 2 (maçonnés), la classification selon le niveau de risque n'est proposée que par type, et donc ce guide ne permet pas aux gestionnaires de comparer leurs ouvrages de Type 1 et Type 2.

Afin de **diminuer le niveau de risque sur un ouvrage**, le gestionnaire peut :

- réduire les aléas ;
- diminuer la vulnérabilité de l'ouvrage ;
- réduire les conséquences.

Ainsi, l'analyse des risques permet de **mieux cibler les travaux d'entretien préventif** (ou les **actions de surveillance**) adaptés pour éviter (ou anticiper) des défaillances futures, limitant ainsi l'occurrence du risque fort. Elle permet également de mettre en place des actions de mise en sécurité (mesure de sauvegarde, voir le fascicule 3 de l'ITSEOA [15]) et de programmer des actions de réparation/confortement le cas échéant et éventuellement de les mutualiser.

Chapitre 3

Étape 2 : Définition du système de l'Analyse des Risques

3.1 - Terminologie – Dimensions courantes – Morphologie

Terminologie

Sur la Figure 5 sont présentés les **différents éléments pouvant constituer un mur poids en maçonnerie** réalisé suivant les règles de l'art. Lorsque le mur est bâti en pierres sèches, les systèmes de drainage (barbacanes, drains) ne sont pas nécessaires, tant que l'eau peut s'évacuer entre les pierres.
La **maçonnerie à l'arrière du parement** peut être différente de celle du parement et être constituée par exemple de moellons ordinaires non appareillés ou en maçonnerie de type béton cyclopéen.
Le **parement côté aval** présente généralement un fruit. La face côté amont peut être constituée de plusieurs redans.

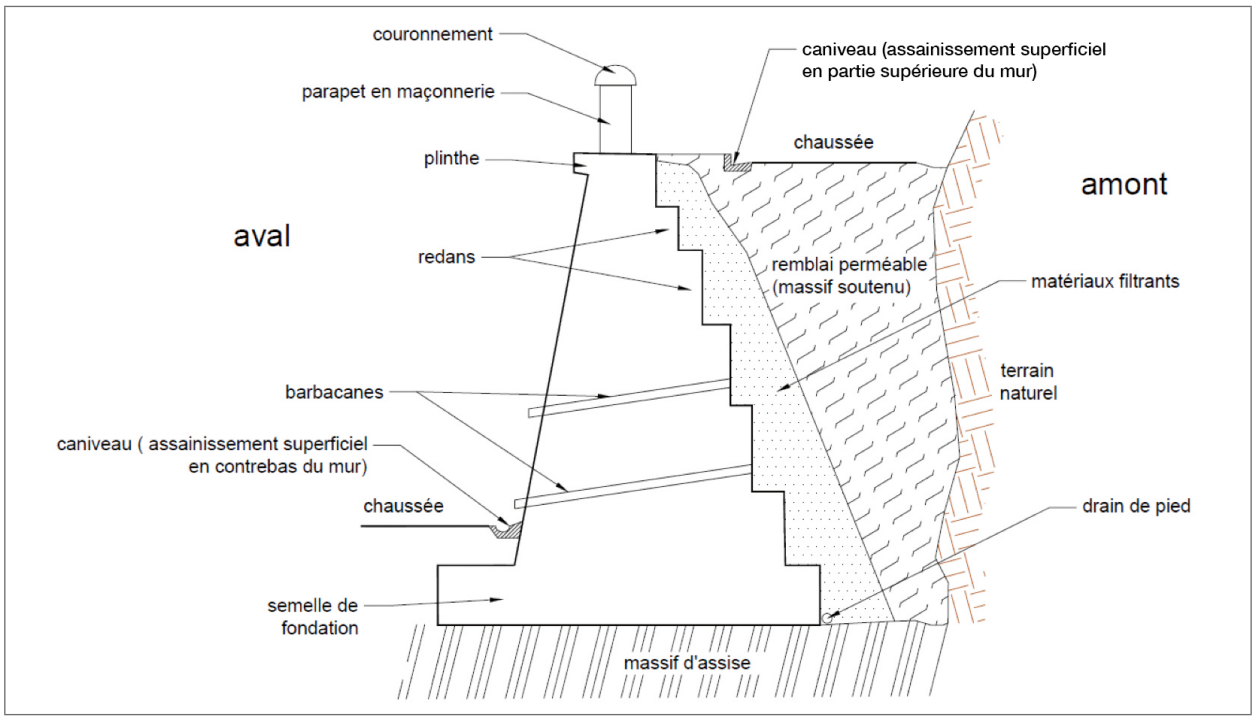


Figure 5 : Mur de soutènement en maçonnerie – terminologie [11]

Conception

Les murs de soutènement en maçonnerie portant des voies de communication ont des origines souvent anciennes (datant pour la plupart du XIX^{e} siècle). Ils présentent une grande diversité de par leur âge, leur constitution, leur mode d'exécution ou leur forme. Par exemple, leurs fondations peuvent se révéler très différentes : semelles béton, racinaux (pièces de charpentes), pilotis, pied de mur directement construit sur le sol...
La **maçonnerie** est un assemblage de blocs rigides (pierres, moellons, briques...), parfois sans liant (mur en maçonnerie de pierres sèches), mais souvent reliés par des joints de mortier en plus ou moins bon état de conservation (mur en maçonnerie jointoyée).

Principe de dimensionnement

Les **murs de soutènement en maçonnerie de pierres sèches ou jointoyées**, font partie de la famille des murs poids, c'est-à-dire dont « la fonction de soutènement est assurée par le poids propre du mur qui équilibre la poussée des terres du massif soutenu, en imposant de fortes contraintes au massif d'assise de fondation » [11]. Dimensionner un mur consiste à déterminer son type et son profil pour qu'il soit stable sous les actions qui lui sont appliquées (*cf.* Annexe 2).
Par sa définition, le mur de soutènement est destiné à supporter, outre son poids propre, l'action qu'exercent sur lui les terres qu'il retient ainsi que les éventuelles surcharges exercées sur ces dernières (chaussée, trafic routier, bâtiment...) et l'eau éventuellement retenue derrière le mur jointoyé si les barbacanes sont bouchées ou absentes.

Géométrie courante

Les murs en maçonnerie sont massifs (Figure 6), leur **épaisseur moyenne**, **hors fondations**, est comprise entre 25 et 40 % de la hauteur de terre soutenue (H).
Ils ont le plus souvent une forme trapézoïdale, avec une **épaisseur à la base** couramment égale à un peu plus du tiers de leur hauteur. En fait, celle-ci dépend largement de la qualité des terrains de fondation, de la pente des terres soutenues et du fruit du mur.
Les murs poids sont généralement réalisés avec **un fruit** plus ou moins important.
La semelle de fondation peut être légèrement inclinée vers l'amont par rapport à l'horizontale, pour améliorer la stabilité de l'ouvrage au glissement.
Suivant la forme de leur section transversale, on distingue (Figure 7) :

- les murs à section rectangulaire ;
- les murs à fruit ou murs à section trapézoïdale ;
- les murs à redans.

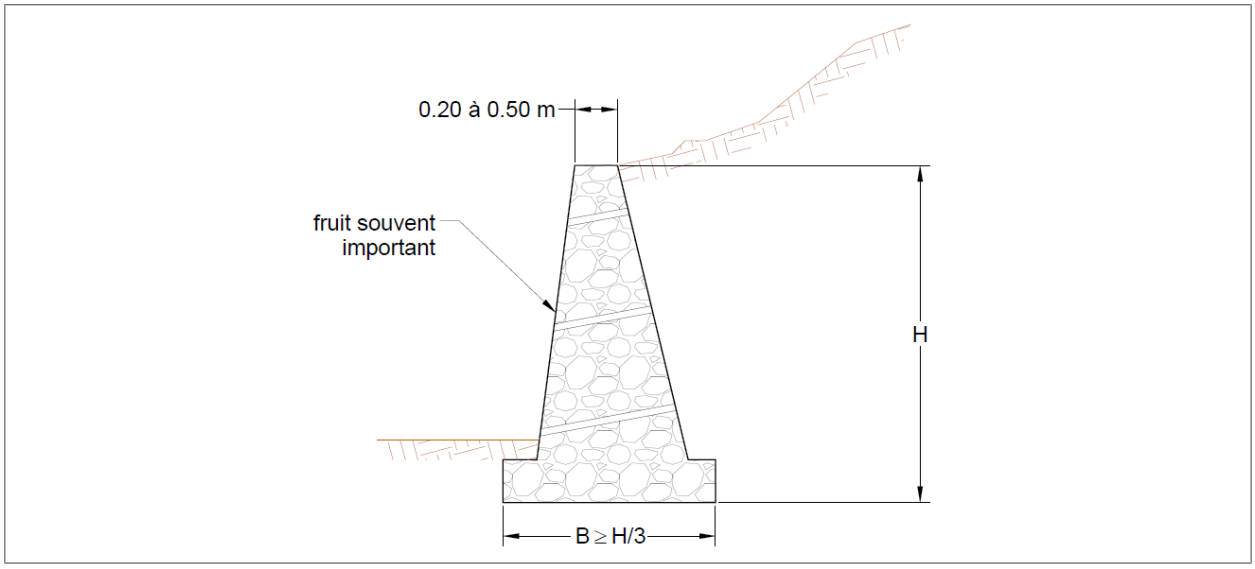
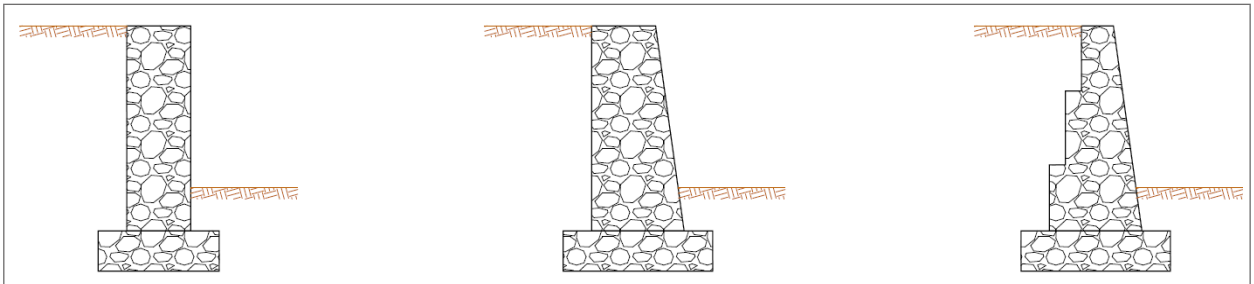


Figure 6 : Dimensionnement courant d'un mur poids [16]



a) Mur à section rectangulaire *b) Mur à fruit* *c) Mur à redans*

Figure 7 : Différentes sections transversales

Résistance des murs en maçonnerie

La maçonnerie est un matériau composite qui a une bonne résistance à la compression mais une très faible résistance à la traction, nulle pour les murs en pierre sèche. En outre, les ouvrages en maçonnerie ont une assez bonne capacité à se déformer sans rompre. Cette souplesse est due :

- **pour les ouvrages en pierre sèche**, aux possibilités de déplacement entre les pierres ;
- **pour les ouvrages en maçonnerie hourdée** (ou jointoyée), au comportement des joints.

Les murs poids existants en maçonnerie, bien que n'étant généralement pas conçus en fonction des exigences règlementaires de la circulation actuelle (surcharge routière, vibrations), se comportent finalement plutôt bien. Les murs aval, en particulier, ont parfois été rehaussés et les voies de circulation qu'ils portent ont été élargies et rapprochées de leur tête. Cela a engendré des poussées supplémentaires conséquentes (poids du remblai et enrobé supplémentaires, action dynamique du trafic situé plus près du mur), qui peuvent être à l'origine de désordres.

Conditions de sol

De par la relative souplesse de la maçonnerie, le terrain de fondation doit être de qualité moyenne à bonne.

Drainage des murs

Les éventuels **systèmes de drainage** ont pour fonction d'évacuer les eaux des remblais :

- **les murs constitués de pierres jointoyées**, relativement imperméables, sont en principe pourvus d'un dispositif de drainage lorsqu'ils ne sont pas destinés à maintenir le niveau d'eau dans les terres soutenues, ce qui est généralement le cas.
- **les murs en pierre sèche** sont auto-drainants. Il arrive que les murs, initialement de pierres sèches, soient jointoyés ultérieurement ; il faut alors vérifier si l'évacuation de l'eau est toujours assurée ou à défaut mettre en place un système d'évacuation des eaux.

Les **caniveaux** (Figure 5) :

- **en haut des murs** captent les eaux de ruissellement de surface pour éviter qu'elles s'infiltrent dans les remblais à l'arrière des murs ;
- **en pied de mur** servent à récupérer l'eau de la chaussée, si elle est à l'aval et si elle est déversée côté mur ainsi que l'eau issue des barbacanes ou traversant le mur s'il est en pierre sèche. Ils ont peu d'utilité si le terrain à l'aval est penté.

Assainissement de l'environnement du mur

Quel que soit le système de drainage dont l'ouvrage est pourvu pour évacuer les eaux à l'arrière du mur, un système d'assainissement doit être effectif pour évacuer les eaux superficielles extérieures, afin d'éviter les pressions hydrostatiques sur le mur. Pour un bon assainissement, il faut prévoir **des caniveaux en haut et en bas** du mur pour l'évacuation de l'eau (Figure 5).

Distinction entre un talus raidi ou perré et un ouvrage de soutènement de type mur poids en maçonnerie

Les talus raidis ne sont pas traités dans ce guide. Il est donc préférable de distinguer un talus raidi d'un mur de soutènement en maçonnerie. Les principaux critères qui permettent de les différencier sont les suivants :

- contrairement à un ouvrage de soutènement, le parement d'un talus raidi n'a généralement **pas de rôle mécanique** (vis-à-vis de la tenue des terres), mais seulement un rôle de protection du talus ;
- le parement d'un talus raidi est de **faible épaisseur par rapport à sa hauteur**, ce qui le rend plus sensible aux désorganisations (Figure 8c), aux poussées des terres...
- le **fruit du parement d'un talus raidi** est :
  - en règle générale supérieur à 30° dans un terrain meuble, auquel cas il s'agit de perré (appelé alors pente du perré),
  - mais peut être inférieur à 30° dans un terrain rocheux, auquel cas on fait référence à un mur de parement.

Un **talus raidi** peut dans certains cas présenter un parement similaire à celui d'un ouvrage de soutènement et de ce fait être confondu avec un ouvrage de soutènement, or il ne doit pas être recensé dans le cadre d'IQOA MURS [10]. Néanmoins, en cas de doute sur sa structure réelle, l'ouvrage pourra être recensé.

3.2 - Matériaux constitutifs

Les murs en maçonnerie sont constitués de blocs (*cf.* § 3.2.1) naturels (pierres) ou artificiels (briques ou béton). Lorsqu'ils sont jointoyés, les joints sont réalisés avec du mortier (*cf.* § 3.2.2).

3.2.1 - Les blocs

Les pierres naturelles

On distingue trois grandes familles de pierres naturelles utilisées en maçonnerie :

- **les roches cristallines**, appelées aussi roches éruptives. Comme leur nom l'indique, ces roches présentent des cristaux (ou grains) visibles. Ces grains sont constitués de silice (quartz) ou de silico-aluminates (feldspaths, micas) ;
- **les roches sédimentaires**. Elles comprennent essentiellement les calcaires (à base de carbonate de calcium $CaCO_3$) dont le grain est souvent moins visible, voire indécelable à l'oeil nu, et les grès, composés de grains le plus souvent siliceux noyés dans une matrice de nature variable ;
- **les roches métamorphiques**. Elles comprennent essentiellement les gneiss, micaschistes et schistes.

Alors que les roches cristallines sont pratiquement isotropes, les deux autres catégories de roches sont plutôt anisotropes car en général caractérisées par une structure feuilletée plus ou moins apparente.

Les blocs artificiels

On distingue deux grands types de blocs artificiels :

- **les briques**. Les briques anciennes étaient pressées[5] et pouvaient être crues (durcies naturellement) ou plus ou moins cuites (durcies artificiellement). Leur fabrication artisanale explique leur hétérogénéité en terme de durabilité conduisant à de fortes altérations (friabilité, creusement) de certaines briques sur un ouvrage alors que d'autres se comportent parfaitement.
  Ces briques anciennes étaient, suivant leur qualité, soit apparentes, soit revêtues par un enduit indispensable pour les protéger de l'eau de pluie avec le risque de rendre le mur perméable en cas de retrait.
  En ce qui concerne **les murs de soutènement du réseau routier non concédé de l'État**, le nombre des murs en briques est infime (moins d'une dizaine). De ce fait, le sujet de la brique n'est pas traité dans ce guide.
- **les blocs béton** sont utilisés en réparation.

5 Actuellement les briques sont filées.

3.2.2 - Le mortier

Constitution

On appelle mortier un mélange de liant hydraulique (chaux, ciment ou mélange des deux), de sable et d'eau. Le choix du liant, généralement un mélange de chaux et de ciment (dit mortier « bâtard »), doit éviter toute incompatibilité physique et chimique (risque d'apparition d'efflorescence[6]) entre les matériaux existants et le mortier.
Des informations sur les différents types de mortiers et sur les liants utilisés pour leur composition sont consultables en Annexe 1.

Fonction des mortiers

Dans la maçonnerie, on distingue :

- **le mortier de hourdage**, c'est le mortier qui remplit les vides entre les éléments du massif. Son rôle est de donner de la cohésion à l'ouvrage et de répartir les contraintes entre les blocs ;
- **le mortier des joints** qui comble les vides entre les pierres et moellons des parties vues de l'ouvrage. Il a une fonction d'étanchéité pour empêcher la pénétration des eaux externes (pluie battante, projection des véhicules) par le parement vu. Il doit conserver une certaine porosité pour permettre l'évacuation des eaux internes au mur non captées par le drainage.

3.3 - Mode de rupture des murs maçonnés (Types 1 et 2)

Le fonctionnement mécanique permet d'identifier les modes de rupture alors que le matériau constitutif permet d'appréhender les modes d'altération et éventuellement la cinétique de dégradation.

Manifestation des désordres

Les désordres au niveau des murs de maçonnerie peuvent se manifester par :

- des **déformations localisées** (ventre, déplacements en tête...) ou **généralisées** (basculement, déversement, bombement – Figure 8a...) ;
- des **fissures**, pouvant concerner les joints, les blocs ou les deux ;
- des **fractures** (Figure 8b), correspondant à une rupture franche du matériau avec désolidarisation des deux parties (ouvertures d'ordre centimétrique). Il est possible que cette fracture s'accompagne d'un mouvement relatif (rejet, glissement...) ;
- des **désorganisations localisées** (Figure 8c), ou **étendues**, correspondant à des mouvements de lit ou lacunes de pierres ou de briques ;
- des **altérations des matériaux** (blocs et/ou joints – Figure 9) sur une profondeur variable, pouvant *in fine* entraîner une défaillance structurale.

a) Bombement *b) Glissement* *c) Désorganisation*

Figure 8 : Exemples de manifestation des désordres

6 Définition Larousse : transformation des sels qui perdent leur eau de cristallisation en devenant pulvérulents.

Figure 9 : Exemples d'altération

Mécanismes à l'origine des désordres[7] [17]

Les désordres au niveau des murs de maçonnerie peuvent être causés par :

- **des défauts de conception et de construction** : briques ou pierres de mauvaise qualité et sensibles au gel, maçonnerie de remplissage hourdée avec des mortiers de mauvaise qualité (insuffisance en dosage du liant, utilisation de chaux aérienne non suffisamment éteinte, mélange de chaux et de terre...), absence ou dysfonctionnement de dispositif de drainage, remblai de mauvaise qualité (argileux, agressifs pour les maçonneries, gonflants....), fondations affouillables, déformations et fissures dues à une mauvaise exécution des fondations (Note 1) ou sur un sol support de faible résistance provoquant des tassements non maîtrisés...
- **l'altération des matériaux** (pierres, briques et mortiers – Figure 9), dont le vieillissement peut être accéléré par les actions des éléments naturels, comme la pluie ou les cycles gel-dégel, qui peut être due à :
  - des désordres physico-chimiques ;
  - la mise en contact de matériaux incompatibles ;
  - des variations de température qui génèrent un changement de volume répété pour les parties d'ouvrage exposées à de forts gradients pouvant conduire à :
    > la diminution de la qualité mécanique des matériaux en provoquant un feuilletage,
    > une circulation de l'eau qui va s'évaporer en surface, entraînant des phénomènes de précipitation de sels dissous amenant un fort durcissement localisé en surface (calcin) et une altération de surface (desquamation), sur les pierres tendres et de forte porosité.
- **la modification des conditions d'utilisation de l'ouvrage en raison :**
  - de l'augmentation des charges d'exploitation,
  - de la modification de la géométrie,
  - des vibrations dues à la circulation actuelle, pouvant conduire au déchaussement de pierres dans des maçonneries de pierres sèches ou de mauvaise qualité,
  - des fissures quasi verticales qui se substituent aux joints inexistants, en l'absence de joints de fractionnement ou de dilatation, dans les murs de grande longueur,
- **la modification de l'ouvrage en raison de l'environnement** (Figure 10) qui comprend :
  - l'action de l'eau et de l'humidité (*cf.* § 3.4.1 - ci-après) (Note 2),
  - l'action de la végétation[8] sur ou au voisinage immédiat des ouvrages (Note 2),
- **l'impact d'une gestion inadéquate de l'ouvrage comme :**
  - des réparations et/ou renforcements mal conduits,
  - une méthode de nettoyage agressive,
- **des actions accidentelles** (chocs de véhicules...).

7 Ce paragraphe a été écrit en s'appuyant entre autre sur le Guide FABEM 6.1 sur la Réparation et renforcement des maçonneries – Généralité et préparation des travaux, édité par le Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures (STRRES) [17].

8 L'importance du développement racinaire lors de la croissance des végétaux peut impacter de manière importante la structure du mur.

Note 1 : Les mouvements des fondations peuvent être provoqués par le tassement et le fractionnement des pierres de fondation qui sont soumises aux plus fortes contraintes et à l'humidité.

Note 2 : L'absence de liant rend les murs de pierres sèches particulièrement sensibles aux actions des éléments naturels : l'infiltration de l'eau, la pénétration de la végétation ou de petits animaux à l'intérieur de la maçonnerie s'en trouve facilitée [18].

Figure 10 : Exemples d'actions de l'eau, de l'humidité et de la végétation

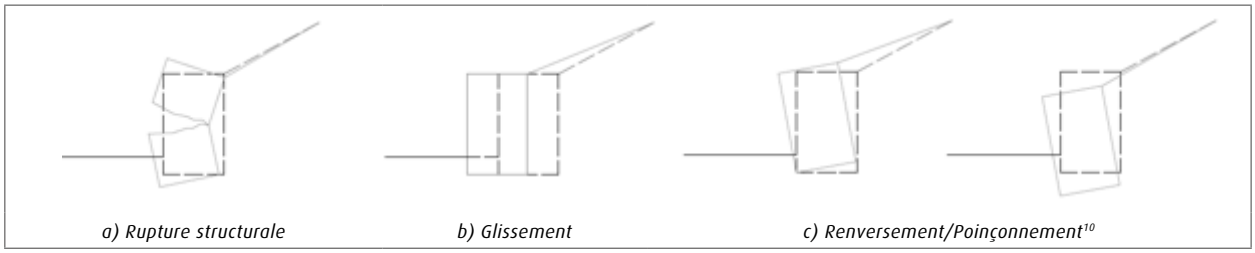
Les modes de ruptures des murs de soutènement en maçonnerie

Dans ce guide, on s'intéresse aux risques de rupture des murs en maçonnerie que l'on peut classifier en deux catégories :

- **rupture par perte de « Stabilité Interne »** (Figure 11a) en raison :
  - d'une « Agressivité du milieu » occasionnée par l'humidité ou par un environnement agressif,
  - d'une « Augmentation des sollicitations sur le mur », par exemple en raison de l'évolution des conditions d'exploitation ou encore d'un choc de véhicule ou l'action d'une déneigeuse[9],
- **rupture par perte de « Stabilité Externe »** par glissement (Figure 11b), par poinçonnement ou par renversement (Figure 11c), qui peut être due à :
  - une « Augmentation des sollicitations sur le mur »,
  - une « Résistance géotechnique en pied défaillante », pouvant résulter d'affouillements en bord de cours d'eau ou de travaux improvisés ou mal étudiés, comme une ouverture de tranchée en pied.

Nous rappelons que la **stabilité au « glissement d'ensemble »** (*cf.* § 1.2) englobant l'ouvrage de soutènement n'est pas traitée par cette analyse des risques.

Par ailleurs, les **murs en maçonnerie renforcés par des tirants, des placages** ne fonctionnent plus comme des murs poids, sortent de ce fait du cadre de ce guide.



a) Rupture structurale *b) Glissement* *c) Renversement/Poinçonnement[10]*

Figure 11 : Stabilité du mur

9 Vient pousser la tête du mur (directement ou par le biais du dispositif de sécurité).

10 Le basculement se fait généralement vers l'extérieur, mais il peut se produire vers l'intérieur en cas de surcharges trop importantes.

3.4 - Notions sur les causes et la nature des désordres

3.4.1 - Les actions de l'eau et de l'humidité

Origines de l'eau

La plupart des pathologies sur les ouvrages en maçonnerie sont liées à l'eau et à sa circulation dans le corps de l'ouvrage ou à l'extérieur de celui-ci (sur leurs parements, dans les remblais soutenus ou au niveau de leur fondation) [17]. La **présence de l'eau** dans la maçonnerie peut :

- être causée par :
  - un mauvais drainage ou une mauvaise évacuation de l'eau,
  - un mauvais état du mortier des joints de parement ou de hourdage, dans le cas des ouvrages en maçonnerie hourdée.
- provenir de son **exposition directe** aux eaux de pluie, aux eaux en pied de mur pour les ouvrages en bord de cours d'eau ou de mer, aux eaux de ruissellement et aux remontées capillaires ;
- avoir des origines accidentelles, comme la rupture d'une canalisation, ou encore suite à une crue.

Lorsque l'eau est en circulation, elle exerce également une action mécanique pouvant conduire à des phénomènes d'abrasion ou encore d'affouillement.

En montagne, cette eau est souvent chargée en chlorure en raison des sels de déverglaçage dispersés sur les routes gelées pour faire fondre le verglas (*cf.* § 4.1.1) ; elle peut se révéler agressive notamment pour les mortiers.

Actions de l'eau

L'eau peut agir en provoquant :

- **l'affouillement des fondations et de l'assise du mur**, lorsque l'eau est en mouvement (circulation en pied de mur en bord de cours d'eau ou effet des vagues en bord de mer) ;
- **l'altération des matériaux de construction :**
  - des mortiers :
    - > par dissolution chimique se traduisant par la présence de coulures de calcite (Figure 12),
    - > par formation de matériaux expansifs,
    - > par entraînement et vidage mécanique des joints (effet abrasif de l'eau chargée en éléments fins),
  - des pierres calcaires ou à liant calcaire (grès),
- **l'expansion mécanique**, lors de la transformation de l'eau en glace en hiver :
  - au niveau des blocs, provoquant l'éclatement et le délitage de certaines pierres,
  - au niveau des joints humides qui éclatent s'ils n'ont pas une porosité suffisante pour permettre l'expansion de l'eau se transformant en glace,
- **l'obstruction des barbacanes** en cas de gel en présence d'eau ;
- **le colmatage par les fines** qui peuvent être transportées par l'eau (colmatage) des vides au sein d'un mur de pierres sèches [18] ou des barbacanes des murs jointoyés, conduisant à une poussée hydrostatique sur le mur de soutènement (identique à une absence de drainage) ;
- **le développement de la végétation** (Figure 13) ;
- **la poussée du mur par la pression hydrostatique** derrière ce dernier en cas d'absence ou de dysfonctionnement du drainage de l'eau.

Figure 12 : Coulures de calcite

Sensibilité des mortiers à l'eau de mer et aux eaux chargées de sel de déverglaçage en fonction du type de liant

Selon le liant, le mortier est plus ou moins sensible au contact avec l'eau salée, ainsi lorsque le liant est constitué de :

- **chaux hydraulique**, dans les zones où le processus de prise est :
  - complet : la solubilisation est lente,
  - incomplet : on assiste à la formation de sels expansifs.
- **ciment de Portland** : il y a risque de formation de sels expansifs ;
- **chaux aérienne** : le mortier n'est normalement pas en contact avec l'eau de mer et est peu sensible aux embruns ;
- **ciment au laitier** (Note) : le mortier présente une meilleure durabilité en raison de la présence de laitier.

Note : Il n'y a pas d'ouvrages anciens montés avec des mortiers réalisés avec du ciment au laitier, ce dernier est aujourd'hui utilisé en rejointoiement, réparation ou reconstruction des ouvrages en mer, ou soumis à des projections d'eau salée.

Agressivité de l'eau en milieu maritime ou de l'eau chargée de sel de déverglaçage en fonction de sa zone d'exposition

L'agressivité de l'eau en milieu marin agit différemment en fonction du niveau de contact avec l'ouvrage (Tableau 1).

Niveau de contact avec l'eau de mer	Description des phénomènes	Progression de l'agressivité
Immergé	Lessivage des composés les plus solubles du mortier	↓
Embruns	Pénétration rapide des ions en raison des cycles humidification/séchage	
Marnage	Pénétration des ions accentuée par l'immersion fréquente	
Projections	Lessivage Pénétration des ions (*cf.* embruns et marnage) Remontées capillaires par la porosité du mortier ⇒ pénétration en profondeur dans la structure	

Tableau 1 : Description des phénomènes occasionnés par l'agressivité de l'eau en milieu maritime en fonction du niveau de contact

Pathologies associées à la présence d'humidité

La présence d'eau (humidité) peut entraîner :

- le développement de la **végétation** (Figure 13) :
  - les mousses[11] favorisent la **dégradation du mortier des joints et de certaines pierres** en produisant des acides humiques et de plus elles conservent l'humidité défavorable aux matériaux de construction des murs,
  - les algues, champignons et lichens, produisent des acides organiques et maintiennent l'humidité,
  - les plantes grimpantes, les plantes à racine et les arbustes, en raison de l'action de leurs racines par des effets chimiques (émission par les racines d'acides) et par des effets mécaniques lors de leur développement (désorganisation) et comblement du système de drainage,
- le développement de la **cristallisation des sels**, souvent en raison de remontées capillaires (pouvant atteindre un à deux mètres au-dessus du niveau du sol en fonction de la porosité[12] des matériaux), dont la plus courante est la formation de « salpêtre ». La cristallisation des sels sur le parement altère ce dernier en formant une sorte de poudre qui, chassée par le vent, laisse ainsi un creusement ;
- la dégradation éventuelle des matériaux constitutifs du mur par le **gel**.

11 Les mousses et lichens créent un biotique qui facilite l'implantation de végétaux de taille plus importante, et donc de risque de destructuration du mur par leurs racines.

12 Définition des différents types de porosité des matériaux (occlue, libre, piégée, interconnectée/non connectée, initiale et acquise – ou respectivement primaire et secondaire) sont définies dans [17].

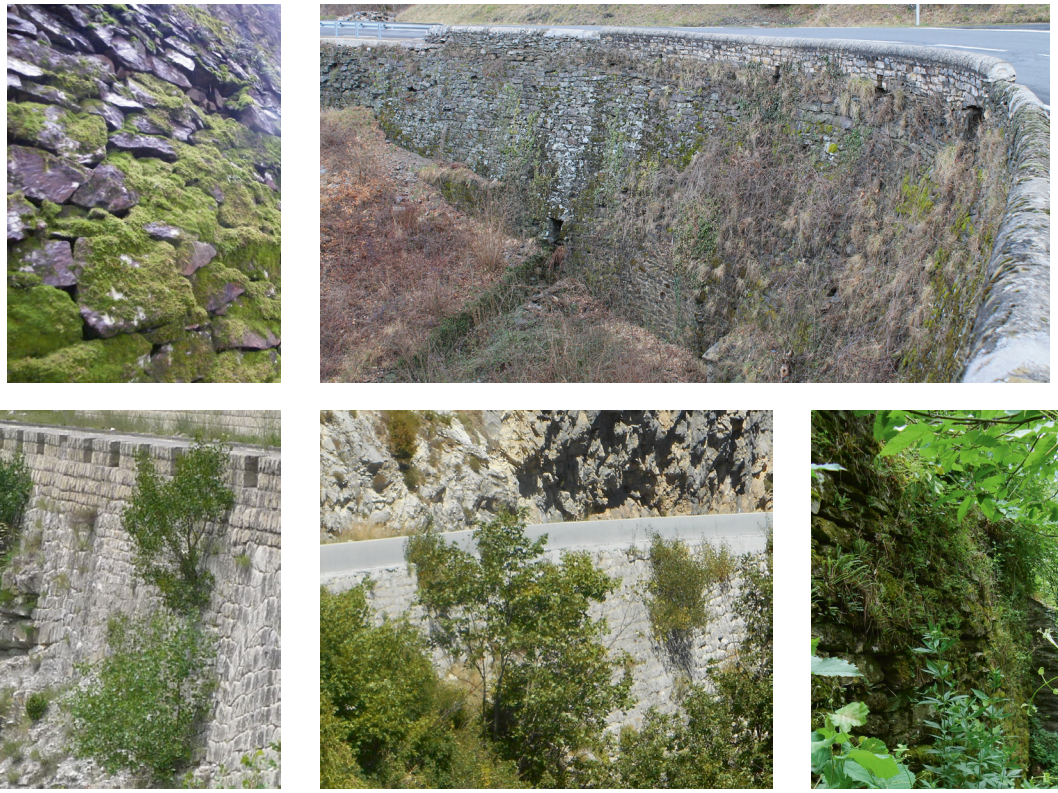


Figure 13 : Développement de la végétation et de mousses

3.4.2 - L'altération des blocs

Les pierres naturelles

La pierre naturelle est un matériau qui s'altère naturellement dans son environnement (après son extraction, réactions physico-chimiques en présence de CO_2, NO_2 et SO_2 dans l'air ou dans l'eau). Pour la plupart, la vitesse de cette dégradation n'est pas à l'échelle du temps humain. En l'utilisant comme matériau de construction, on ne fait que l'accélérer, en soumettant généralement les pierres naturelles à des contraintes et à des sollicitations climatiques plus importantes que dans son milieu naturel, voire à des contraintes physico-chimiques nouvelles lorsque la pierre est mise en contact avec un matériau incompatible.
De nos jours, le choix d'une pierre naturelle adaptée peut être conduite selon la norme NF B 10-601.

Les principales causes d'altération des pierres naturelles

Les principales causes d'altération des pierres naturelles sont :

- la **gélivité** (en lien avec la porosité) : la transformation de l'eau liquide en glace peut engendrer une augmentation de volume de l'ordre de 9% créant ainsi des contraintes mécaniques fortes provoquant la fissuration et des épaufrures de la matrice [17] ;
- **l'organisation de la matrice de la pierre naturelle**, en présence :
  - de litage, engendrant des surfaces de rupture au regard de la direction des contraintes [17],
  - d'inclusions de résistance plus faible que la pierre principale[13], conduisant à une diminution de la résistance à la compression [17],
  - de microfissures ou fissures au sein de la matrice [17],
  - d'irrégularité de la surface (suite à une altération du matériau).

13 Veines ou cavités remplies de matières terreuse ou pulvérulentes.

- **l'incompatibilité chimique « pierre-mortier »** : altération du liant de la pierre au contact du mortier avec apparition d'efflorescences (pouvant entraîner la destruction de la pierre) agravée en présence de sulfates, de sulfures, de chlorures et de nitrates ;
- les **contraintes occasionnées par la variation de volume d'autres éléments** (en acier[14], aluminium, zinc, cuivre...) intégrés dans le mur : le **gonflement** en raison du developpement de la corrosion pour l'acier, entraînant le développement de fissures.

Pour en savoir plus, on peut se référer au « Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre » [19].

Pathologies spécifiques en fonction de la nature de la roche

Il convient de noter que la nature des pierres influe sur le comportement du mur et sur l'évaluation structurale qui en découle.

Une des principales causes de dégradation de certaines pierres est leur nature inappropriée pour la construction de murs, c'est-à-dire :

- **leur manque de dureté** qui facilite l'érosion (éolienne ou hydraulique) de surface ;
- **d'autres caractéristiques** telles que la sensibilité à la cristallisation des sels en surface due souvent au manque de porosité du mortier des joints qui empêche des échanges hydriques.

Sont présentés ci-dessous deux exemples de pathologie propre à des natures de roche :

- **la roche calcaire** [17] : l'eau de pluie, polluée et acidifiée par les gaz et fumées provenant des véhicules automobiles ou du chauffage urbain, va pénétrer par capillarité dans la pierre calcaire, conduisant à une sectorisation en profondeur de la roche, en trois zones[15] dont celle la plus proche de la surface forme une croûte appelée « sulfin », dont la densité et la dureté plus élevées que la pierre d'origine provoquent à terme la décohésion du matériau.
- **certaines roches**, comme le calcaire, peuvent intéragir avec le mortier.

3.4.3 - L'altération des mortiers

Les principales altérations des mortiers et leurs causes

Les principales altérations des mortiers sont sa décomposition. Les causes en sont :

- **une composition mal adaptée** à l'environnement du mur et aux efforts qu'il doit supporter, par exemple :
  - l'abrasion mécanique par les particules transportées par l'eau ou le vent qui crée une érosion d'un mortier de résistance insuffisante,
  - les attaques physico-chimiques : dissolution de la chaux par les eaux pures[16], séléniteuses[17] et acides[18], réaction alcali-granulat, action d'eaux chargées en chlorures[19], eau de mer chargée éventuellement en magnésium,
  - la désagrégation par le gel,
- **le manque d'adhérence du mortier aux pierres** dû à une mauvaise mise en œuvre (mortier desséché ou rebattu, pierres non humidifiées, absence de cure, désorganisation des pierres.

---

14 Le coefficient de dilatation des aciers de construction vaut 12.10^{-6} [17].

15 Définies comme suit à partir de la surface :
- *croûte dure de sulfocarbonate de quelques millimètres en général (forte compacité, faible perméabilité),*
- *pierre déminéralisée (appauvrissement en carbonate de calcium) sur une dizaine de centimètres d'épaisseur (porositée élevée et capillarité généralement forte),*
- *pierre possédant des caractéristiques proches de la pierre naturelle.*

16 Eaux de pluie et eaux granitiques.

17 Eaux chargées en sulfate de chaux au contact du gypse ou sulfate pouvant être contenus dans l'eau de mer. Sulfates + chloroalminates ➛ ettringite (sels de Candlot) qui a des propriétés expansives et sulfate + mortier de chaux ➛ gypse secondaire qui a des propriétés expansives.

18 Les eaux résiduelles, d'origine industrielle ou domestique, sont plus ou moins chargées en produits acides insuffisamment neutralisés, en effluents d'huiles minérales ou végétales, en savon, etc., qui attaquent les liants hydrauliques.

19 Exemples d'apport en chlorure : eau de mer et eaux chargées de sel de déverglaçage. Chlorures de calcium (pouvant être contenues dans l'eau de mer) + mortier ➛ formation de chloroaluminates.

Paramètres améliorant la résistance du mortier aux agressions

Normalement pour un mur jointoyé, on devrait avoir :

- **pour les joints de la face contre terre**, un mortier relativement imperméable pour empêcher l'arrivée d'eau dans le mur par le remblai ;
- **pour les joints côté parement, un mortier** relativement perméable pour permettre l'évacuation des eaux internes au mur.

La résistance des mortiers peut être améliorée en respectant les conditions suivantes :

- un **dosage en liant**, qui peut être de la chaux, du ciment ou le mélange des deux doit être adapté (*Note*) à la nature des pierres (*cf.* les normes NF P15-319 et NF P15-317) ;
- la **qualité de l'appareillage** (*cf.* Annexe 1) :
  - une faible épaisseur du joint,
  - une assise régulière,
  - une utilisation de pierres de taille.

Note :

- *Un mortier trop dosé en liant, de résistance à la compression trop élevée, provoque des éclatements des bords des pierres, si elles sont de faible résistance à la compression ;*
- *Il est préférable d'utiliser des mortiers bâtards (liant composé d'un mélange de chaux et de ciment) plus souples et moins étanches que les mortiers de ciment, sauf en présence d'eau salée, où les ciments au laitier sont à adopter.*

3.4.4 - Pathologies provenant d'une mauvaise qualité des matériaux de remblai

Une mauvaise qualité des matériaux de remblai et de leur mise en œuvre influent sur la poussée des terres sur le mur. Les pathologies en découlant sont entre autres :

- les **déversements, glissements et déformations** dus à :
  - des poussées des terres trop fortes par insuffisance de cohésion et d'angle de frottement interne des matériaux,
  - des poussées hydrostatiques trop fortes causées par leur perméabilité insuffisante,
  - des gonflements de matériaux sensibles à la présence d'eau (phénomène de retrait/gonflement).
- les **décompressions de terrain à l'arrière du mur** en raison de la dissolution de matière ou de l'érosion interne (entraînement des fines) du remblai par l'eau.

Chapitre 4

Étape 3.1 : Identification des aléas

Ce chapitre, première partie de l'analyse simplifiée des risques, présente les **aléas potentiels** que peuvent subir les murs en maçonnerie, leurs impacts ayant été présentés dans le chapitre 3.

Certains critères reposent sur les **notes IQOA** (§ 1.1) et sont donc associés à des numéros de défauts dont le titre est fourni et dont des schémas illustratifs se trouvent dans le document « IQOA Murs – Mur poids en maçonnerie, Type 1 et Type 2 » [11][20].

Trois aléas ont été retenus :

- l'aléa **« Agressivité du milieu »** (§ 4.1) ;
- l'aléa **« Augmentation des sollicitations sur le mur »** (§ 4.2) ;
- l'aléa **« Résistance géotechnique en pied défaillante »** (§ 4.3).

Les **facteurs non retenus**, mais qui peuvent être étudiés dans le cadre d'une analyse détaillée lorsque les circonstances le requièrent, sont (liste non exhaustive) :

- **la « Chute de blocs »** constitutifs du mur, en considérant qu'un éventuel endommagement du mur entraînerait des réparations ;
- **le « Séisme »**, les sollicitations sismiques n'ont pas été retenues dans ces aléas, les ouvrages à examiner étant supposés dans la même zone sismique. La prise en compte de ces sollicitations dans le dimensionnement des murs est récente et de ce fait, les ouvrages anciens présentent une plus grande sensibilité à ce type d'aléa. L'âge de l'ouvrage constitue donc une vulnérabilité et est considéré comme telle plus loin dans l'analyse.
  Une méthode d'évaluation sommaire et qualitative de la vulnérabilité sismique des murs de soutènement a été développée au Cerema sous le nom de « Sismur » [20] sur la base de critères géomécaniques, mécaniques et typologiques relativement accessibles (hauteur et épaisseur en tête, matériaux constitutifs, état général, pente et caractéristiques géotechniques des terrains...), et selon quatre modes de rupture identifiés (par glissement, par renversement, par poinçonnement du sol ou par rupture interne du mur) ;
- **l'« Appareillage »** (*cf.* Annexe 1), la « qualité de la mise en œuvre » et la « nature des blocs » (*cf.* § 3.2 et 3.4) interviennent dans la réponse aux aléas, mais aucun facteur discriminant simple n'a pu être dégagé.

Chaque aléa est décliné en facteurs et est évalué au moyen de critères en additionnant les « points » donnés pour chacun d'eux.

On invite par ailleurs le gestionnaire à faire une analyse en deux temps :

- une **« Procédure rapide »**, à partir des éléments en sa possession ;
- une **« Procédure plus longue »**, si nécessaire (§ 7.1), réclamant par exemple, la recherche et la consultation du dossier d'ouvrage (la plupart du temps inexistant dans le cas des murs en maçonnerie).

4.1 - Aléa « Agressivité du milieu »

Il s'agit de prendre en considération tous les facteurs significatifs conduisant à une **altération de la résistance structurale du mur poids en maçonnerie**. Il s'agira majoritairement de facteurs conduisant à une altération des blocs ou du joint éventuel et/ou à une désorganisation des blocs (Figure 8c) et du mortier de hourdage (les phénomènes y conduisant sont décrits dans le paragraphe 3.3), qui à terme peuvent affecter la fonction résistante du mur, ainsi que la sécurité des usagers. Cette désorganisation peut ne concerner que les joints, potentiellement attaqués sur une profondeur importante, jusqu'à parfois une disparition complète.

20 Téléchargeable gratuitement sur le site PILES www.piles.setra.equipement.gouv.fr.

Il est rappelé (*cf.* § 3) que :

- **les blocs**, constitués de pierres ou de briques, et le **mortier de hourdage** sont sensibles au gel et à la pollution au contact d'agents agressifs pouvant être apportés par l'atmosphère et par l'eau.
- **les joints** peuvent être attaqués par les actions du gel et des agents agressifs au sein d'un environnement humide, pouvant être apportés par l'atmosphère, par l'eau ou encore par le sol.

Ainsi, les **différents facteurs retenus** pour cette analyse des risques accompagnant cet aléa sont :

- **le facteur « Salage – Froid/Gel »** en raison de son apport en chlorures en ce qui concerne les mortiers et pour définir les zones où le gel peut agir et endommager les blocs et/ou les joints ;
- **le facteur « Environnement humide »**, facteur indispensable à tous les développements d'agression des mortiers ;
- **le facteur « Environnement agressif »**, représentatif de la pollution de l'air et des eaux de ruissellement pour les blocs et/ou les joints et des agents agressifs provenant du sol constituant le remblai et venant altérer le mortier.

4.1.1 - Le facteur « Salage – Froid/Gel »

Le critère retenu : La fréquence de salage, c'est-à-dire le nombre moyen de jours d'application sur une année, va d'une part traduire l'apport en chlorures et d'autre part, cibler les zones concernées par l'action du gel. Lorsque le mur protège une voie et en porte une autre (Figure 14), la fréquence de salage est prise comme la somme de celles des deux voies.

Nota :
- la distance entre la voie salée et le mur est également un paramètre important. Cependant, en l'absence d'élément d'appréciation quantifiable, cette considération n'est pas prise en compte en première approche. Néanmoins, par analogie à l'Eurocode 2 (article 4.2 – Note 1), le salage n'est pas à considérer si la distance est supérieure à 6 m ;
- la circulation d'eau va favoriser la pénétration des chlorures, cependant en raison de la difficulté de prise en compte des conditions hydrauliques du site, ce critère n'a pas été retenu.

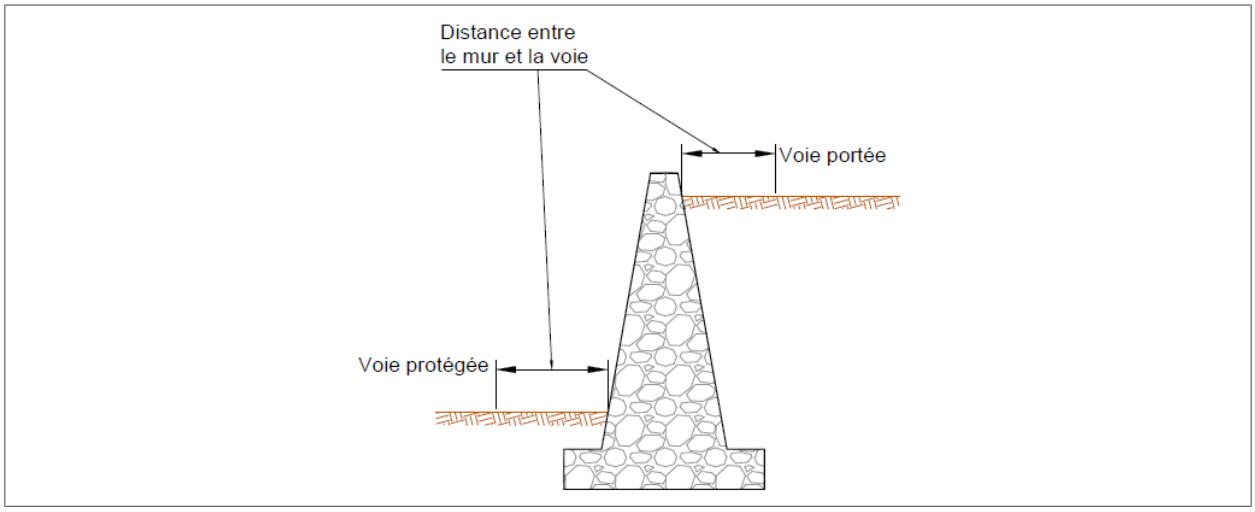
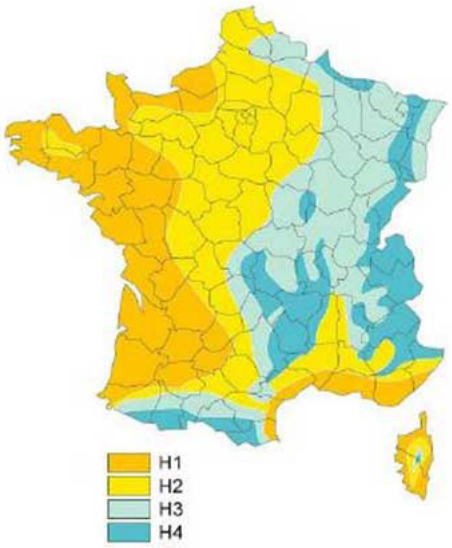


Figure 14 : Schéma des distances aux voies protégées ou portées par le mur

Source de la donnée : Les modalités de salage demeurent du ressort de la politique locale du gestionnaire. La fréquence de salage telle que définie dans la norme NF EN 206/CN (Figure 15) peut être estimée à partir de la consommation de sel obtenue, par exemple auprès des Centres d'Entretien et d'Intervention (CEI) des Directions Interdépartementales des Routes (DIR). En l'absence d'information locale sur la fréquence de salage, on s'appuiera, en première approximation, sur la carte de salage ci-après (Figure 15) issue de la norme NF EN 206/CN, ou encore sur le fascicule de documentation FD P 18-326, qui fixe les niveaux de gel à utiliser par canton et éventuellement en fonction de l'altitude pour les zones montagneuses.



H1 : hiver clément, salage peu fréquent n < 10

H2 : hiver peu rigoureux, salage fréquent n ≤ 30

H3 : hiver assez rigoureux, salage très fréquent n > 30

H4 : hiver rigoureux, salage très fréquent n > 30

avec **n** : nombre de jours

Figure 15 : Carte de salage [21]

4.1.2 - Le facteur « Environnement humide »

Les critères retenus : L'humidité des matériaux constitutifs et par corollaire de leur environnement est un des paramètres régissant le processus d'altération du mortier mais aussi des blocs (voir explications § 3.4.1). On s'intéresse donc aux modalités de contact de l'ouvrage avec l'eau. Par simplification[21], on distingue donc les murs ayant leur base soit en zone de marnage, soit immergée en permanence.

Les critères aggravants :

Deux critères aggravants ont été retenus :

- le **contact de l'ouvrage avec l'eau de mer** (apport en chlorures) ;
- les **zones tropicales** en raison des conditions de température et d'hygrométrie y régnant (environnement favorisant l'altération des joints et des blocs).

La source de la donnée **: Connaissances du gestionnaire, observations sur place.**

4.1.3 - Le facteur « Environnement agressif »

Les critères retenus : Les agents agressifs vis-à-vis de l'attaque du mortier constituant les joints peuvent provenir de :

- **l'activité anthropique**, comme la présence d'industries[22], d'activités agricoles (par exemple, l'acide organique) ou l'urbanisation (par exemple, les eaux usées). L'origine de la pollution peut être multiple et avoir un caractère aléatoire et accidentel. L'absence d'activités humaines permet, le plus souvent, d'écarter l'éventualité d'une rupture de canalisation d'eau usée ou d'eau de pluie.
- **la présence de sols agressifs** (gypse, anhydrite, pyrite, évaporites, vases, tourbes).

En ce qui concerne l'altération des blocs (en pierre ou brique), les agents agressifs ne proviennent que de l'activité anthropique.

Nota : La **diffusion de la pollution (ou de la contamination)** va être sensible au fonctionnement hydrogéologique, ainsi qu'à la perméabilité des sols traversés, critères qui ne peuvent être renseignés sans une étude détaillée spécifique. A titre indicatif et à défaut de connaissance plus précise, une zone d'influence de 250 m à l'amont du mur a été arrêtée pour répertorier les sources éventuelles de pollution ou de contamination.

21 Il est difficile d'évaluer le niveau d'humidité du mur, donc n'ont été considérées que les situations sans ambiguité, mais le gestionnaire peut, en fonction de sa connaissance, adapter son évaluation.

22 Une distinction est faite sur la dangerosité des sites industriels.

La source de la donnée :

- **L'activité anthropique : Connaissance de l'occupation du site** ou informations disponibles sur le **site internet www.georisques.gouv.fr**[23], entre autres, sur les sites pollués, les installations classées, les canalisations de matières dangereuses (gaz, hydrocarbures, produits chimiques) et les installations nucléaires.
- **La présence des sols agressifs** : Exploitation des cartes géologiques[24] ou connaissance géologique du site[25].

4.1.4 - Évaluation de l'aléa « Agressivité du milieu »

Le système de **notation** du Tableau 2 est utilisé pour évaluer l'aléa « Agressivité du milieu » des murs en maçonnerie de pierres sèches, « Type 1 » selon la méthode IQOA, et jointoyée « Type 2 » : A1= a11 + a12 + a13 + a14.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation du facteur concerné.

Nota : On rappelle que les murs « amont » protègent la voie et ceux « aval » la soutiennent.

Salage[26] au regard de l'apport en chlorure et du gel					
Types 1 et 2	Absence	< 10 jours/an (H1)[27]	Entre 10 et 30 jours/an (H2)[27]	> 30 jours/an (H3 et H4)[27]	
a11	0	+1	+3	+5	
Environnement humide (ouvrage en contact avec l'eau côté aval[28] visible)					
Type 2	Pas de contact avec l'eau	En contact permanent avec l'eau	En zone de marnage	**Critères aggravants :** En contact avec de l'eau de mer	**Critères aggravants :** Climat tropical
a12	0	+1	+2	+1	+2
Environnement agressif contre le parement[29] (non visible)					
Types 1 et 2	Autres environnements (*a priori* sans agents agressifs)	Zones urbaines	Activités agricoles	Sites industriels : Courants	Sites industriels : Défavorables
a13	0	+3			+5
	Sols agressifs[30]				
Type 2	Absence avérée	**Aucune information**	Présence possible[31]	Présence avérée dans le terrain amont	Présence avérée dans le remblai
a14	0	+2	+1	+3	+5

Tableau 2 : Système de notation de l'aléa « Agressivité du milieu »

23 BASIAS : inventaire historique des sites industriels et activités en service.

24 En l'absence de version papier des cartes géologiques, le site du BRGM « Infoterre » peut être consulté sur www.infoterre.brgm.fr.

25 Dans le cadre d'une analyse des risques détaillée, une analyse de carottes de sol permettra de lever le doute.

26 Lorsque le mur protège et porte des voies, la fréquence de salage est la somme de celle des deux voies. En présence de mur étagé, les murs concernés sont ceux en contact avec une voie.

27 H1, H2, H3 et H4 correspondent à des niveaux de salage selon la carte présentée sur la Figure 15.

28 L'eau est souvent présente en amont du mur, mais il est difficile de le déterminer.

29 La zone d'influence est de l'ordre de 250 m autour du mur.

30 Gypse, pyrites, vases, tourbes...

31 Car déjà repérée dans le secteur.

4.2 - Aléa « Augmentation des sollicitations sur le mur »

Par hypothèse, on considère tout ouvrage comme correctement dimensionné vis-à-vis des efforts auxquels il est soumis à sa construction. En revanche, si son environnement ou son mode de fonctionnement sont modifiés lors de son exploitation, alors l'ouvrage risque de ne plus pouvoir résister à ces nouvelles sollicitations. On considère qu'il peut y avoir deux **origines à l'augmentation des sollicitations sur le mur** :

- **une non accidentelle :**
  - le facteur « Évolution des conditions d'exploitation de la voie portée »,
  - le facteur « Évolution de l'aménagement en tête ou à l'amont du mur »,
- **une accidentelle :**
  - le facteur « Augmentation de la pression hydrostatique à l'amont du mur »,
  - le facteur « Instabilité du terrain amont »,
  - le facteur « Choc de véhicule ou action de la déneigeuse ».

4.2.1 - Le facteur « Evolution des conditions d'exploitation de la voie portée »

Les critères retenus : **Trafic journalier des poids lourds (PL) et transports exceptionnels**, si la voie portée est située à une distance inférieure ou égale à 1,7 fois la hauteur du mur par rapport à la tête du mur (Figure 16), ce qui est généralement le cas.

En réalité, il convient d'évaluer l'évolution du trafic depuis la réalisation du mur. Le gestionnaire doit tenir compte de l'évolution des aménagements de l'environnement de l'ouvrage (par exemple, une augmentation du trafic poids-lourd importante en raison d'une ouverture de carrière ou au contraire sa fermeture, la création d'une ZAC[32]...). En cas d'absence d'information, on retient le trafic actuel par sécurité et homogénéité de traitement.

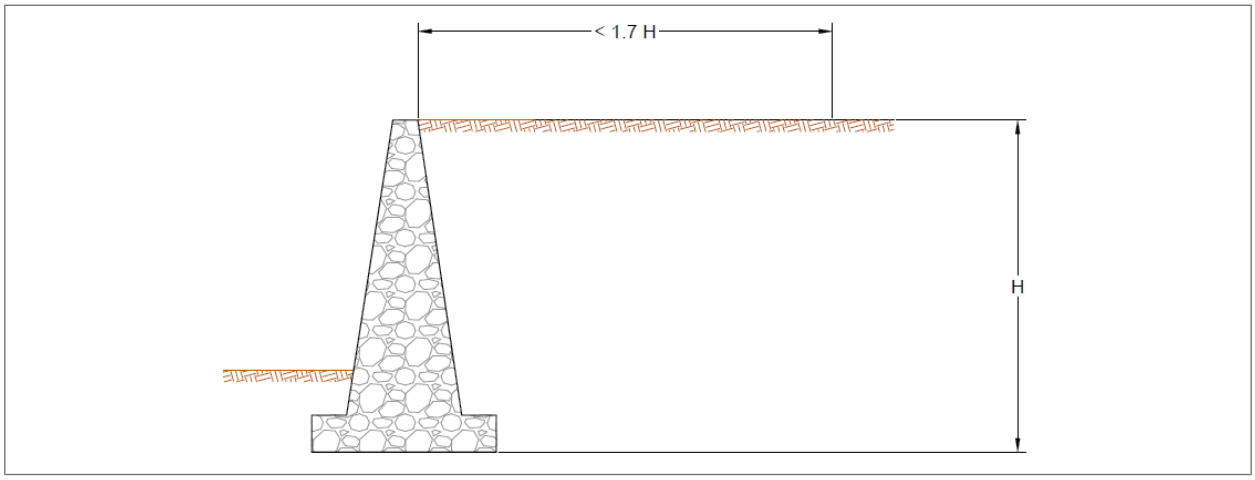


Figure 16 : Zone de chargement influençant la poussée des terres sur le soutènement

Le critère aggravant : Si la voie est identifiée comme un **axe de transport exceptionnel**, elle risque de supporter des charges exceptionnelles ne correspondant pas à son dimensionnement courant. Dans le cadre du présent guide, on considère comme exceptionnels les convois dépassant 120 tonnes.

Les sources de la donnée : **Connaissance du gestionnaire** (logiciel de gestion d'ouvrages d'art, par exemple SIAMOA[33]) ou **logiciel de gestion de trafic** (par exemple « ISIDOR[34] »).

32 *ZAC : Zone d'Aménagement Concerté.*

33 *SIAMOA :. En service dans tous les services gestionnaires d'infrastructures de l'État, elle comprend la base de données de l'ensemble des ponts, murs de soutènements, tranchées et couvertures, tunnels mais également des portiques, potences et hauts mats (PPHM) de signalisation sur les routes et autoroutes du réseau routier national non concédé.*

34 *ISIDOR est une application web permettant de consulter, gérer, publier, analyser, cartographier des données du patrimoine routier national.*

4.2.2 - Le facteur « Evolution de l'aménagement en tête ou à l'amont du mur »

Les critères retenus : **Toute construction récente ou accumulation de matériaux**, respectivement construite ou stockée dans la zone d'influence immédiate de l'ouvrage en amont du mur. Sont donc incluses toutes les charges supposées non prévues lors de sa conception : bâtis, voiries[35], parkings, dépôts (décharge, terres), talus, charges ponctuelles d'importance remarquable (pylônes électriques, portiques...), surélévation du mur par des ouvrages (murs antibruit, ouvrages de protection contre les chutes de blocs, des merlons...) ou rehausse du mur avec son remblaiement[36]. Il y a aussi une accumulation de matériaux parfois non perceptible, comme le rechargement en enrobé sur plusieurs années. Ce chargement est parfois identifiable lorsque le mur possède un parapet, car celui-ci n'est presque plus visible depuis la chaussée.

Toute surcharge va augmenter la poussée des terres sur l'ouvrage et sur ses fondations (§ 3.3), et risque d'entraîner un tassement, un déplacement du mur ou encore de conduire à sa rupture structurale. Plus elle est proche de la tête du mur et plus elle aura un effet défavorable (Figure 16).

Dans cette analyse des risques, nous partons du principe que pour tous ces aménagements, le mur n'a pas fait l'objet d'un renforcement.

Les sources de la donnée : Pour la réalisation d'aménagements non prévus lors de la conception du soutènement :

- **inspection visuelle** attestant de la présence d'une surcharge (bâtis, voiries, parking, dépôts, rehausse, surélévation...), ou éventuellement signes laissant supposer par exemple une rehausse du mur ;
- **connaissance du gestionnaire** ;
- **photographies aériennes** multi-dates accessibles (dates des campagnes de prises de vues) sur les sites Internet qui permettent de remonter le temps :
  - l'IGN[37] sur plusieurs décennies,
  - « Google-earth » sur plusieurs années[38].
- **documents attestant** d'une réalisation (bâtis, voiries, parking, rehausse, surélévation...).

4.2.3 - Le facteur « Augmentation de la pression hydrostatique à l'amont du mur »

Les critères retenus : L'arrivée d'eau en quantité importante à l'arrière d'un mur de Type 2-IQOA (maçonnerie jointoyée), quelle qu'en soit l'origine, est à la source de nombreuses pathologies pouvant provoquer des ruptures de mur. Plusieurs critères ont été retenus pour évaluer ce facteur :

- **critère « Immersion totale ou partielle du mur lors d'une crue »** conduisant à une imbibition du mur et des terrains ou des remblais à l'arrière du mur depuis le pied du mur et entraînant des poussées hydrostatiques lors de la décrue et dont l'importance dépend de l'efficacité du drainage interne. On s'intéressera donc au niveau de l'aléa « Inondation » et de l'occurrence d'une crue ;
- **critère « Arrivées d'eau accidentelles »**, suite à une rupture de canalisation ou à une défaillance d'étanchéité d'un bassin ou d'un canal qui sont des critères non facilement identifiables. On va donc estimer la probabilité de leur présence à l'arrière du mur ou à proximité de celui-ci en fonction de l'environnement (zone urbaine, résidentielle, industrielle, dispositifs d'irrigation ou autre) ;
- **critère « Pluies extrêmes »**, lors d'évènements pluvieux importants, la quantité d'eau s'infiltrant à l'arrière du mur peut excéder la capacité de drainage du mur, occasionnant alors une augmentation significative de la poussée hydrostatique, pouvant mener à la rupture de l'ouvrage. Le critère retenu est l'occurrence d'événements pluvieux extrêmes (> 200 mm/j) ;

35 Par exemple, en raison d'une modification de tracé, les voies de circulation ont été rapprochées du mur ou ajout d'une voie.

36 Une simple élévation par clôture ou parapet n'implique pas de modifications significatives sur les efforts, et de ce fait n'est pas prise en compte dans le cas de surcharge éventuelle.

37 https://remonterletemps.ign.fr/.

38 Outil « afficher les images d'archive ».

- **critère « Gestion des eaux pluviales »**[39], la mauvaise gestion des eaux pluviales à l'amont du mur peut être à l'origine de très forts ruissellements de surface et/ou d'écoulements épidermiques dans le sol et, par conséquence, d'arrivées d'eau massives à l'arrière du mur. La gestion de l'eau pluviale doit être étudiée afin d'identifier tous les aménagements qui pourraient conduire à une accumulation d'eau à l'arrière du mur, voire empêcher l'évacuation des eaux hors du mur. En raison de la difficulté de mise en œuvre de cette analyse, nous ferons reposer ce critère sur les signes laissant envisager une mauvaise gestion : stagnation d'eau en haut du mur ou ruissellements diffus ou concentrés vers la tête du mur.

Nota : Ce facteur ne concerne pas a priori les ouvrages de pierres sèches (Type1-IQOA). Ils ont un drainage naturel, et ne peuvent donc pas être soumis à une poussée hydrostatique qu'occasionnerait la rétention de l'eau derrière le mur (à l'exception du cas où le sol fin constituant le remblai viendrait obstruer les espaces entre les éléments).

Les critères aggravants :

- **critère « Arrivées d'eau accidentelles »**, la présence d'une défaillance connue (rupture de canalisation...), n'ayant pas encore fait l'objet d'une réparation, constitue un critère aggravant ;
- **critère « Gestion des eaux pluviales »**, en raison d'une plus grande concentration d'arrivée d'eau, la position du mur en partie basse d'un bassin versant et/ou l'imperméabilisation des terrains[40] amont (en absence d'aménagement spécifique, comme un bassin de rétention d'eau) constituent un critère aggravant.

Les sources des données :

La principale source de données de ces différents critères est la connaissance du gestionnaire. L'environnement du mur est très important ; les pentes conduisent à des concentrations d'arrivée d'eau et l'imperméabilisation des sols peut provoquer de gros dégâts avec de simples pluies décennales.

- **critère « Immersion totale ou partielle du mur lors d'une crue »** : **Cartographies de l'aléa inondation** existantes (cartographie nationale sur le site internet Géorisques[41], sites spécifiques à certains districts hydrographiques[42], cartes d'aléa communales PPRI (Plan de Prévention des Risques d'Inondation), auprès des DREAL[43], DDT(M)[44] ou éventuellement informations plus précises auprès des communes et/ou à partir d'une approche hydrogéomorphologique succincte) ;
- **critère « Arrivées d'eau accidentelles »** : analyse hydrogéomorphologique succincte de la zone (Note) grâce *aux cartes topographiques IGN, géologiques, aux photographies aériennes...*

Note : A titre indicatif et à défaut de connaissances plus précises, une zone d'influence de 50 m autour du mur a été arrêtée pour répertorier les sources éventuelles de fuite de liquide. En présence de pente forte, de terrains plutôt imperméables et de débit important, cette distance peut être augmentée.

39 Pour information, en France, la loi sur l'Eau (2006) ainsi que le code de l'urbanisme imposent la prise en compte de la problématique de gestion des eaux pluviales aux collectivités territoriales détentrices de cette compétence (syndicat, communauté de communes ou communes), principalement à partir de 2 outils réglementaires :

- *le **zonage pluvial** (appelé aussi Schéma Directeur de Gestion des Eaux Pluviales – SDGEP, Schéma Directeur d'Assainissement Pluvial – SDAP ou Schéma Directeur des Eaux Pluviales – SDEP) menant à la délimitation des zones où l'imperméabilisation doit être limitée et les zones où il est nécessaire de prévoir des systèmes de collecte des eaux pluviales ; ce document a une portée réglementaire uniquement s'il est intégré au Plan Local d'Urbanisme – PLU ;*
- *le **règlement d'assainissement** définissant les conditions et modalités de déversement des eaux usées et pluviales dans le réseau collectif de la collectivité et dont les préconisations intègrent les contraintes du zonage pluvial.*

40 L'imperméabilisation des terrains ne concerne pas le passage d'une route non revêtue à une revêtue, qui serait plutôt une amélioration car elle permettrait la diminution d'arrivée d'eau dans le remblai derrière le mur.

41 http://www.georisques.gouv.fr. Pour le moment, les cartographies établies dans le cadre de la mise en œuvre de la Direction Inondation (accessibles sur http://www.georisques.gouv.fr/cartes-interactives) ne sont pas exploitables en l'état pour le travail d'analyse des risques. A terme, les données en ligne seront vraisemblablement mises à jour.

42 Par exemple, le district hydrographique Rhône-Méditerranée (http://carmen.developpement-durable.gouv.fr/115/directive_inondation.map).

43 DREAL : Direction Régionales de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement.

44 DDT(M) : Direction Départementale des Territoires (et de la Mer).

- **critère « Pluies extrêmes » :**
  - En métropole : Les départements ayant connu au moins un **événement pluvieux journalier** > 200 mm entre 1966 et 2015 sont identifiés par Météo France[45]. Néanmoins le gestionnaire peut faire le choix d'une approche plus fine sur son parc en interrogeant le site internet de Météo-France[46] afin d'identifier si un évènement pluvieux journalier supérieur à 200 mm a été enregistré dans un rayon de 20 km autour de la commune dans laquelle se situe l'ouvrage. Dans ce cas, il pourra alors considérer qu'à partir d'un seul événement répertorié, son ouvrage est affecté de la qualification « pluies extrêmes fréquentes ». Dans le cas contraire, il pourra abaisser la qualification d'un niveau.
  - Hors-métropole (à titre d'exemples) :
    - > les Antilles, la Réunion et Mayotte sont soumis à des épisodes cycloniques à très forte pluviométrie[47].
    - > La Guyane ne présente pas d'événements extrêmes avec une pluviométrie journalière > 200 mm, mais en revanche peut être soumise à « la succession d'épisodes pluvio-orageux [...] pouvant entraîner des cumuls de pluie importants, à l'origine de crues, d'inondations voire même de glissements de terrain »[48].
- **critère « Gestion des eaux pluviales » : Cotations IQOA** sur le « Drainage en partie supérieure du mur – évacuation de l'eau » (numéros de défauts : 3210 – *Stagnation d'eau partie supérieure du mur* ; 3211 – *Configuration d'ensemble drainage / partie supérieure du mur* ; 3220 – *Dégradation du dispositif d'évacuation des eaux* ; 3221 – *Dégradation des dispositifs de collecte et de descente des eaux* ; 3222 – *Colmatage des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux en partie haute)* ou **inspection visuelle** pour relever ces défauts.

4.2.4 - Le facteur « Instabilité du terrain amont »

Le critère retenu : Présence de **marqueurs caractéristiques d'un glissement de terrain** en amont du mur (fissures avec décalages, affaissements, tassements, bourrelets de terrain sur un linéaire appréciable) dans la zone d'influence du mur.

Le critère aggravant : **Un glissement ponctuel recensé à une distance de 50 m maximum de l'ouvrage** est considéré comme un critère aggravant.

Les sources de la donnée : **Cotations IQOA** sur la « zone d'influence en partie supérieure du mur – stabilité d'ensemble » (numéros de défauts : 1110 – *Fissuration du terrain parallèle au mur* ; 1111 – *Fissuration du terrain en arc de cercle* ; 1112 – *Tassement du terrain en tête de mur* ; 1113 – *Tassement de terrain* ; 1114 – *Bourrelets de terrain, 1115 – Erosions)* ou **consultation du site « Présence de glissement de terrain »**[49] ou **inspection visuelle** pour relever ces défauts.

4.2.5 - Le facteur « Chocs de véhicule ou action de la déneigeuse »

Le critère retenu : **Accidentologie sur un itinéraire** si la tête du mur fait office de dispositif de sécurité ou de retenue (Figure 17) ou s'il lui est associé par ancrage. Ce facteur ne concerne donc que les murs aval (soutenant la voie portée)[50].

45 http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Episodes-mediterraneens.html (consulté et carte éditée en février 2016).

46 http://pluiesextremes.meteo.fr/france-metropole/Autour-d-une-commune-sur-1-jour.html.

47 Données sur le site internet de Météo France http://pluiesextremes.meteo.fr/ (consulté en février 2016).

48 Données sur le site internet de Météo France http://pluiesextremes.meteo.fr/guyane/Typologie-des-precipitations.html (consulté en février 2016).

49 http://www.georisques.gouv.fr/dossiers/mouvements-de-terrain/donnees#/ (consulté en mai 2019).

50 Les chocs en pied du mur ne sont pas pris en compte en considérant que si l'accident est grave, un contrôle sera effectué, et dans le cas contraire, la résistance du mur n'est pas impactée.

Figure 17 : Exemple de mur portant un dispositif de sécurité

Les critères aggravants :

- Si la voie portée est proche de la tête du mur et/ou le dispositif de sécurité[51]/retenue est ancré au mur, **l'impact du choc** sera plus important et constitue un critère aggravant.
- **En cas de neige**, l'action de la déneigeuse vient pousser la tête du mur (directement ou par le biais du dispositif de sécurité) de façon non négligeable et non considérée lors du dimensionnement du mur. Ce critère aggravant doit être pris en compte lorsque la déneigeuse se trouve à moins de 0,50 m de la tête du mur.

Les sources de la donnée : **Connaissance du gestionnaire.**

4.2.6 - Évaluation de l'aléa « Augmentation des sollicitations »

Le système de notation du Tableau 3 est utilisé pour évaluer l'aléa « Augmentation des sollicitations » des murs en maçonnerie de pierres sèches (« Type 1 » selon la méthode IQOA) et jointoyée (« Type 2 ») :

A2 = a21 + a22 + a23 + a24 + a25 + a26 + a27 + a28.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

Nota : On rappelle que les murs amont protègent la voie et ceux aval la soutiennent.

51 Appelé aussi garde-corps, parapet, glissière ou barrière.

Evolution des conditions d'exploitation de la voie portée[52] (Trafic Poids Lourds)

Types 1 et 2	< 1500 PL/jour	Entre 1500 et 6000 PL/jour	> 6000 PL/jour	**Critère aggravant :** Transports exceptionnels[53]
a21	0	+3	+6	+4

Evolution de l'aménagement en tête ou à l'amont du mur à moins de 1,7H[54] de la tête du mur

			Réalisation non prévue lors de la conception du mur			
Types 1 et 2	Absence d'aménagement	Talus ou Charges ponctuelles importantes[55] ou Ouvrages en tête de mur[56]	Bâtis	Voiries et parkings, ...	Dépôts[57]	Rehausse du mur et son remblaiement
a22	0	+3	+6	+8	+12	+15

Augmentation de la pression hydrostatique à l'amont du mur

	Immersion totale ou partielle du mur lors d'une **crue**				
Type 2	Absence d'inondation	**Aucune information**	Aléas « inondation » modéré ou Crue centennale	Aléas « inondation » **sans précision** de niveau / période de retour	Aléas « inondation » **fort** ou Crue décennale
a23	0	+2	+6		+10
	Arrivée d'**eau accidentelle** possible par défaillance[58]				
	Environnement de l'ouvrage			Présence avérée de canalisations et/ou de bassin en eau à proximité de la tête du mur	
Type 2	Zones non aménagées	Zones aménagées (résidentielle, industrielle, urbaine...)		oui	**Critère aggravant :** Défaillance connue
a24	0	+6		+10	+5
	Pluies extrêmes				
	Aucun épisode pluvieux extrême	Métropole		Hors métropole	
Type 2		Pluies extrêmes rares[59] Départements : 04, 05, 09, 38, 40, 43, 63, 65, 81	Pluies extrêmes fréquentes Départements : 06, 07, 11, 12, 13, 2A, 2B, 26, 30, 34, 48, 66, 83, 84	Guyane	Antilles, Réunion, Mayotte
a25	0	+6	+15	+6	+15

[...]

52 Si la voie portée est située à une distance inférieure ou égale à 1,7 fois la hauteur du mur (visible) par rapport à la tête du mur (Figure 16).

53 Ce critère aggravant peut être réduit à 1 s'il s'agit de demandes occasionnelles de transport exceptionnel.

54 Dans cette analyse des risques, nous partons du principe que tous ces aménagements n'ont pas fait l'objet d'un redimensionnement.

55 Par exemple, pylônes électriques, portiques...

56 Par exemple, murs anti-bruit, ouvrages de protection de chute de blocs...

57 Par exemple, décharge de terre.

58 À titre indicatif et à défaut de connaissances plus précises, une zone d'influence de 50 m autour du mur a été arrêtée pour répertorier les sources éventuelles de fuite de liquide. En présence de pente forte, de terrains plutôt imperméables et de débit important, cette distance peut être augmentée.

59 Correspond à moins d'un événement pluvieux extrême sur 10 ans.

[...]

	Système de gestion des eaux pluviales					
	Note IQOA sur le « drainage en partie supérieure du mur »					
Type 2	1	2	2E	NE	Absence de système de collecte, d'évacuation et de descentes des eaux	**Critère aggravant :** Point bas d'un bassin versant et bassin versant élémentaire et/ ou imperméabilisation amont du sol[60]
a26	0	+4	+7	+7	+10	+5

Instabilité du terrain amont					
	Note IQOA de la « zone d'Influence en partie supérieure du mur »				**Critère aggravant :** Evénement glissement ponctuel recensé à une distance de 50 m de l'ouvrage
Types 1 et 2	1 ou 2	2E	3 ou 3U	NE	
a27	0	+4	+8	+6	+7

Choc de véhicule ou action de la déneigeuse en tête du mur aval				
	Zone accidentogène		**Critères aggravants :**	
Types 1 et 2	Non	Oui	Voie portée proche de la tête du mur et/ou Dispositif de sécurité ancré au mur (distance < 1 m)	Action de la déneigeuse (distance < 0,5 m)
a28	0	+3	+2	+2

Tableau 3 : Système de notation de l'aléa « Augmentation des sollicitations »

4.3 - Aléa « Résistance géotechnique en pied défaillante »

Cet aléa peut conduire à une déformation de l'ouvrage, voire à un mouvement d'ensemble de type renversement ou glissement.

Différents facteurs peuvent conduire au développement de cet aléa :

- le **facteur « Travaux en pied de l'ouvrage »**, engendrant un remaniement du sol à l'aval de l'ouvrage et pouvant conduire à une diminution de la butée à l'avant et de la portance sur le sol de fondation nécessaires à la stabilité du mur ;
- le **facteur « Instabilité du terrain aval »**, entraînant une instabilité en pied de l'ouvrage ;
- le **facteur « Présence d'eau »**, en raison des risques d'affouillement ou de perte de résistance des terrains en pied du mur.

60 En absence d'aménagement spécifique, comme un bassin de rétention d'eau. Le fait d'imperméabiliser une route non revêtue n'est pas un facteur aggravant (bien au contraire).

4.3.1 - Le Facteur « Travaux en pied de l'ouvrage »

Les critères retenus : **Modification géométrique défavorable postérieure à la construction**, comme une excavation ou une modification défavorable du profil du terrain (par exemple, inclinaison vers l'aval) ou encore **un remaniement du sol** lors de la pose de réseau[61] (Figure 18).

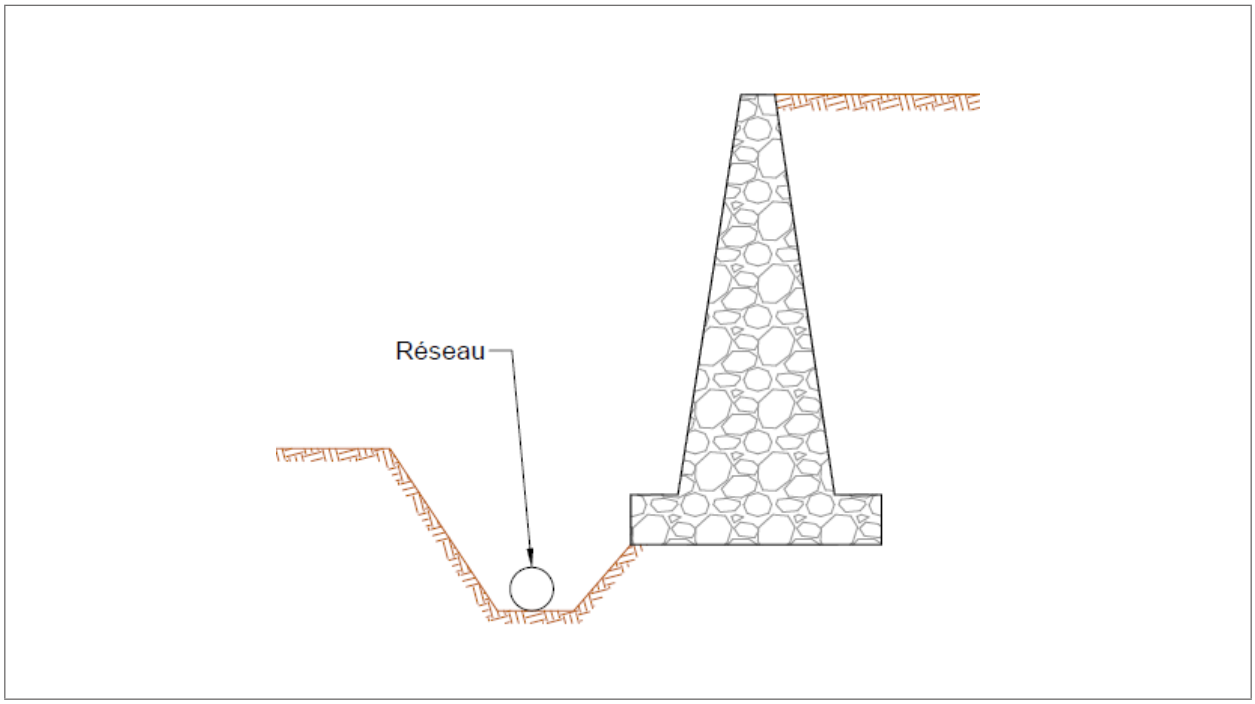


Figure 18 : Diminution de la butée en pied de l'ouvrage et de la portance du sol de fondation

Les sources de la donnée : **Connaissance du gestionnaire** ou **état de l'ouvrage** (côté aval) par rapport au dossier de l'ouvrage (DOE[62]) s'il est disponible et **inspection visuelle** (présence de regards, trace de remaniement de terrain).

4.3.2 - Le facteur « Instabilité du terrain aval »

Les critères retenus : Il s'agit de répertorier les **indices d'instabilité du terrain en contrebas du mur** (fissurations, bourrelets...).

Les critères aggravants : les **profils topographiques défavorables** (pentes naturelles fortes) en présence de terrains meubles exerçant une poussée ou la **présence d'un glissement ponctuel** recensé à une distance de 50 m maximum de l'ouvrage qui représentent des critères aggravants.

Les sources de la donnée : **Cotations IQOA** sur la « zone d'Influence en contrebas du mur – stabilité d'ensemble» (numéros de défauts : 1210 – *Fissuration du terrain parallèle au mur,* 1211 – *Fissuration du terrain en arc de cercle*, 1213 – *Bourrelet de terrain*) ou **consultation du site « Présence de glissement de terrain[63] » ou inspection visuelle** pour relever ces défauts.

61 Tous les réseaux sont concernés : eaux de pluie, eaux usées, électricité, assainissement...

62 DOE : Dossier de l'Ouvrage Exécuté. Le DOE est une notion récente. Pour les ouvrages anciens, on fait référence aux plans de recollement. Si la pose de réseaux à l'aval de l'ouvrage a été faite ultérieurement à la construction de l'ouvrage, ils n'y figurent pas. Il faudrait plutôt voir les plans de réseaux des concessionnaires du domaine publique ou privé suivant la domanialité du terrain aval.

63 http://www.georisques.gouv.fr/ rubrique « Mouvements de terrain ».

4.3.3 - Le facteur « Présence d'eau »

Les critères retenus : Il s'agit de relever **des indices de présence ou de circulation d'eau en aval du mur** (risques d'affouillement), pouvant entre autres résulter de la concentration de la collecte des eaux d'assainissement ou de drainage en amont du mur.

Le critère aggravant : La présence importante d'eau en pied du mur constitue un critère aggravant, on distingue :

- **un cours d'eau** (prendre en considération les éventuelles crues) ;
- **la mer.**

Les sources des données :

- pour **la présence d'eau : Cotations IQOA** sur le « drainage en contrebas du mur – évacuation de l'eau » (numéros de défauts : 3310 – *Stagnation d'eau,* 3311 – *Chute d'eau sur le parement de l'ouvrage,* 3312 – *Configuration d'ensemble favorisant les stagnations d'eau et/ou les érosions et les ravinements du massif d'assise,* 3320 – *Dégradation du dispositif de collecte et de descente des eaux en contrebas du mur,* 3321 – *Colmatage des dispositifs de collecte et d'évacuation des eaux en contrebas du mur)* ou **inspection visuelle** pour relever ces défauts ;
- pour **la présence d'un cours d'eau ou de la mer** : **Connaissance du gestionnaire** et **cartes IGN**.

4.3.4 - Évaluation de l'aléa « Résistance géotechnique en pied défaillante »

Le système de notation du Tableau 4 est utilisé pour évaluer l'aléa « Résistance géotechnique en pied défaillante » des murs en maçonnerie de pierres sèches (« Type 1 » selon la méthode IQOA) et jointoyée (« Type 2 ») :

A3 = a31 + a32 + a33.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

Travaux en pied de l'ouvrage			
Types 1 et 2	Absence	Présence de réseau direct en pied du mur	Excavation / Modification défavorable du profil du terrain
a31	0	+2	+5

Instabilité du terrain aval						
	Note IQOA de la « zone d'Influence en contrebas du mur »				**Critères aggravants :**	
Types 1 et 2	1 ou 2	2E	3 ou 3U	NE	Présence de pentes naturelles fortes[64]	Evénement glissement ponctuel recensé à une distance de 50 m de l'ouvrage
a32	0	+4	+8	+6	+3	+4

Présence d'eau en aval du mur				
	Aucune présence d'eau	Note IQOA sur le « drainage en contrebas du mur »		**Critère aggravant :** Cours d'eau ou mer en pied
Types 1 et 2		2 (stagnation)	2E (érosion, ravinement)	NE
a33	0	+2	+4	+3	+3

Tableau 4: Système de notation de l'aléa « Résistance géotechnique en pied défaillante »

64 > 30° peut être donné à titre indicatif, à adapter à la nature du terrain et à la présence de végétation.

Chapitre 5

Étape 3.2 : Vulnérabilité aux aléas

Ce chapitre, seconde partie de l'analyse simplifiée des risques, présente la vulnérabilité des murs aux aléas décrits dans le chapitre 4. Les critères font parfois appel aux règles de l'art rappelées en partie § 3.1 de ce guide.

Comme pour les aléas, certains critères reposent sur les notes IQOA (§ 1.1) et sont donc associés à des numéros de défauts dont le titre est fourni et dont des schémas illustratifs se trouvent dans « IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) – Murs, Murs de soutènement, Mur en maçonnerie, Types 1 et 2 » [11][65].

Trois vulnérabilités ont été retenues en regard des trois aléas définis dans le chapitre 4 :

- la vulnérabilité à l'**« Agressivité du milieu »** (§ 5.1) ;
- la vulnérabilité à l'**« Augmentation des sollicitations sur le mur »** (§ 5.2) ;
- la vulnérabilité à la **« Résistance géotechnique en pied défaillante »** (§ 5.3).

Comme pour les aléas, chaque vulnérabilité est déclinée en facteurs et est évaluée au moyen de critères en additionnant les « points » donnés pour chacun d'eux. De même, **le gestionnaire est invité à faire une analyse selon deux procédures**, une rapide et l'autre plus longue si nécessaire (§ 7.2).

5.1 - Vulnérabilité à l'« Agressivité du milieu »

5.1.1 - Le facteur « Défauts structuraux »

Les critères retenus : Vulnérabilités internes relatives à des défauts structuraux du mur en maçonnerie, qui fragilisent de ce fait la structure. Le critère retenu est celui de l'« Epaisseur du mur » en tête et à la base, dont l'importance est une garantie de robustesse à la dégradation des matériaux.

Nota : Une mauvaise mise en œuvre des blocs comme une mauvaise qualité des mortiers ou des pierres[66] va faciliter la détérioration du mur et diminuer sa résistance, mais il n'est pas possible de les prendre en considération dans cette analyse des risques simplifiée.

Les sources de la donnée : Pour les valeurs seuils, on se réfère aux règles de l'art, par exemple dans le guide du Sétra [16], à défaut de vérifications calculatoires. Ces valeurs ont pu être retranscrites dans le dossier de l'ouvrage.

65 Téléchargeable gratuitement sur le site PILES www.piles.setra.equipement.gouv.fr.

66 Par exemple, les marnes et grés s'altèrent et se creusent.

5.1.2 - Le facteur « Robustesse » des matériaux constitutifs du mur

Les critères retenus : Vulnérabilités associées à la fragilité de l'ouvrage vis-à-vis de la rupture interne en raison de son état :

- **critère « Altération des blocs »** (Figure 9) : on s'intéresse à **l'état des blocs ou aux contextes conduisant à sa détérioration** (*cf.* § 3.4.2) comme la présence de végétation ou de zone humide par exemple ;
- **critère « Disjointoiement, altération des joints de hourdage »** (Figure 19 et Figure 20) : on s'intéresse à toutes les configurations mettant en évidence une **perte d'efficacité des joints pour les murs jointoyés** (Type 2).

Les joints en parement ont souvent été refaits superficiellement et ne permettent pas toujours de juger de l'état réel du mortier de hourdage (on peut éventuellement les inspecter à partir des barbacanes, ou bien dégarnir une partie d'un joint de parement, lorsqu'accessible).

Figure 19 : Disjointoiement, altération des joints

Figure 20 : Lacunes en blocs (départ de la maçonnerie de parement) ou formation de cavité dans la maçonnerie

Le critère aggravant : **La porosité des blocs** facilitant l'attaque par les agents agressifs est considérée comme un critère aggravant.

Les sources des données :

- **critère « Altération des blocs » : Cotations IQOA** « structure du mur – défauts matériaux» (numéros de défauts : 4134 – *Altération des pierres/briques de la maçonnerie du parement,* 4135 – *Présence de végétation,* 4136 – *Eléments de maçonnerie fracturés,* 3110 – *Zones humides, ruissellements d'eau, efflorescences, concrétions sur le parement du mur*) ou **inspection visuelle** pour relever ces défauts ;
- **critère « Disjointoiements, altération des joints » : Cotations IQOA** « structure du mur – défauts matériaux » (numéros de défauts : 4130 – *Jointoiements, altérations des joints,* 4131 – *Descellements des moellons, lacunes,* 4132 – *Cavités, effondrements partiels,* 4133 – *Désorganisation de la maçonnerie*) ou **inspection visuelle** pour relever ces défauts.

5.1.3 - Évaluation de la vulnérabilité à l'« Agressivité du milieu»

Le système de notation du Tableau 5 est utilisé pour évaluer la vulnérabilité à l'« Agressivité du milieu » des murs en maçonnerie de pierres sèches (« Type 1 » selon la méthode IQOA) et jointoyée (« Type 2 ») :

V1 = v11 + v12 + v13 + v14.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

Défauts structuraux			
	Epaisseur du mur		
Types 1 et 2	En tête		
v11	≥ min (H/12 ; 0,30 m)	Aucune information disponible	< min (H/12 ; 0,30 m)
	0	+2	+3
	A la base		
	< 0,3		
Types 1 et 2	non	Aucune information disponible	oui
v12	0	+2	+3

Robustesse des matériaux (blocs et mortier)						
	Altérations des blocs					
Types 1 et 2	0	2	2E	3	3U	**Critère aggravant** Pour les cotations 0, 2 ou 2E[67] : Pierre poreuse
v13	0	+1	+2	+4	+5	+3
Type 2	**Disjointoiement, altération des joints**					
	0	2	2E	3	3U	
v14	0	+5	+6	+7	+8	

Tableau 5: Système de notation de la vulnérabilité à l'« Agressivité du milieu»

5.2 - Vulnérabilité à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur »

5.2.1 - Le facteur « État structural de l'ouvrage »

Un ouvrage dégradé présente généralement une altération de sa résistance. Toute augmentation des sollicitations sur l'ouvrage représente un risque accru de rupture pour celui-ci, *a fortiori*, un ouvrage dégradé présente généralement une altération de la résistance, donc une vulnérabilité plus grande vis-à-vis de l'augmentation des sollicitations.

Les critères retenus : Signes de désordres majeurs, de type :

- **déformation, bombement** (Figure 8a) ou **déplacement d'ensemble** dans le sens horizontal (en plan) ou vertical (en élévation) avec apparition de fissures ou de bourrelets dans la zone d'influence ou sur la chaussée ;
- **fractures obliques multiples avec décalage vertical** (Figure 8b), **rejet ou ouverture** supérieur à 0,5 mm (Figure 21) ;
- **déversement vers l'aval** (mouvement d'ensemble) supérieur à H/100 ou déversement vers l'amont (à ne pas confondre avec le fruit d'origine du parement).

Nota : Les défauts sont plus difficilement observables sur les murs de pierres sèches que sur les murs jointoyés (par exemple : les fractures, les déformations, les défauts de drainage...).

67 Pour son caractère évolutif.

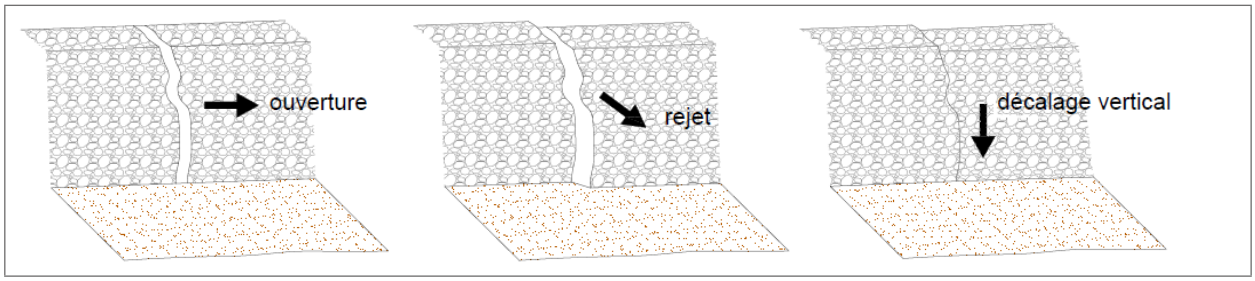


Figure 21 : Schéma représentant un décalage vertical, un rejet et une ouverture

Les sources de la donnée : **Cotations IQOA** sur la « structure – mouvement, déformations » (numéros de défauts : 4110 et 4111 – *Déversement respectivement vers l'aval et vers l'amont,* 4112 et 4113 – *Déplacement ou déformation plan ou en élévation,* 4114 – *Déversement de la partie haute du mur,* 4115 – *Basculement de l'extrémité du mur,* 4116 – *Bombement,* 4117 – *Défaut d'horizontalité des lits de pierres du parement)* et sur la « Structure – fractures » (numéros de défauts : 4120, 4121 et 4122 – *Fractures verticale de type I, verticale ou oblique de type II ou de type III,* 4123 – *Décollement de chaîne d'angle,* 4124 – *Fracture horizontale)* ou **inspection visuelle** pour relever ces défauts.

5.2.2 - Le facteur « Système de drainage »

Les critères retenus : Indices de mauvais drainage du mur.

Le critère aggravant : En raison du fort impact de la poussée de l'eau sur le mur en cas d'absence de drainage, l'absence de barbacanes ou de tout autre dispositif de drainage constitue un critère aggravant.

Les sources de la donnée : **Cotations IQOA** du « drainage interne du mur – désordres sur parement (drainage interne) » (numéros de défauts : 3110 – *Zones humides, ruissellements d'eau, efflorescences, concrétions sur le parement du mur,* 3111 – *Ecoulements de fines du matériau du remblai,* 3120 – *Altération du dispositif de drainage interne,* 3121 – *Absences de barbacanes ou de drains,* 3122 – *Fonctionnement du dispositif apparent de drainage interne)* ou **inspection visuelle** pour relever ces défauts.

5.2.3 - Le facteur « Reconnaissance géotechnique »

Le critère retenu : Présence ou absence de **rapport de reconnaissance géotechnique**, avec des informations suffisantes pour établir un diagnostic « sol et fondation ».

La source de la donnée : Rapport de reconnaissance géotechnique, s'il y en a un dans le **dossier d'ouvrage exécuté** (DOE) ou dans le **dossier de recollement**.

5.2.4 - Le facteur « Distance entre la voie portée ou surcharge et la tête du mur »

Le critère retenu : **Rapport entre la distance de voie portée (ou de la surcharge) et la tête du mur** par rapport à la hauteur visible du mur de soutènement (Figure 16), car l'impact de l'augmentation de surcharge s'atténue avec l'éloignement au mur. En cas de mur de hauteur variable, le gestionnaire peut tronçonner son ouvrage ou prendre la valeur la plus défavorable, soit la plus petite hauteur.

La source de la donnée : **Mesures lors de visites**.

5.2.5 - Évaluation de la vulnérabilité à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur »

Le système de notation du Tableau 6 est utilisé pour évaluer la vulnérabilité à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur » des murs en maçonnerie de pierres sèches (« Type 1 » selon la méthode IQOA) et jointoyée (« Type 2 ») : V2 = v21 + v22 + v23 + v24.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

État structural de l'ouvrage				
	Note IQOA de la « structure »			
Types 1 et 2	1 ou 2	2E	3 ou 3U	NE
v21	0	+7	+15	+11
Système de drainage du mur				
	Note IQOA sur le « drainage interne du mur »			
Type 2	1 ou 2	2E	NE	**Critère aggravant :** Absence de barbacanes ou de drains
v22	0	+7	+5	+5
Reconnaissances géotechniques « suffisantes » pour un diagnostic « sol-fondation »				
Types 1 et 2	Présence	Absence	Aucune information[68]	
v23	0	+5	+2	
Distance entre la tête de mur et le positionnement de la charge (voie portée ou surcharge)				
Types 1 et 2	Distance > 1,7 H	0,5 H < Distance < 1,7 H	Distance < 0,5 H	
v24	0	+5	+10	

Tableau 6 : Système de notation de la vulnérabilité à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur »

5.3 - Vulnérabilité à la « Résistance géotechnique en pied défaillante »

5.3.1 - Le facteur « Conception structurale »

Les critères retenus : **Connaissance ou non des caractéristiques de l'ouvrage et vérification des seuils géométriques** des parties constitutives du soutènement favorisant sa résistance issus des « règles de l'art » [16].

La source de la donnée : **Dossier d'ouvrage exécuté (DOE) ou de recollement**.

5.3.2 - Le facteur « Résistance géotechnique en pied fragilisée »

Les critères reconnus : Il s'agit d'identifier la présence avérée de **phénomènes d'affouillement ou de ravinement** qui diminueraient la résistance du mur.

La source des données : **Cotations IQOA** sur la « structure – fondations » (numéros de défauts : 4210 – *Affouillement du lit du cours d'eau, de ses berges ou fosse d'érosion (en site aquatique)*, 4220 – *Ravinement en site terrestre)* ou **inspection visuelle** pour relever ces défauts.

68 Choix en cas de « procédure rapide ».

5.3.3 - Évaluation de la vulnérabilité à la « Résistance géotechnique en pied défaillante »

Le système de notation du Tableau 7 est utilisé pour évaluer la vulnérabilité à la « Résistance géotechnique en pied défaillante » des murs en maçonnerie de pierres sèches (« Type 1 » selon la méthode IQOA) et jointoyée (« Type 2 ») : V3 = v31 + v32+ v33 + v34.

<table>
<tr><td colspan="5">Conception structurale (cf. dimensions courantes sur la Figure 6)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Types 1 et 2
v31</td><td colspan="4">Fondation</td></tr>
<tr><td colspan="2">Sol d'assise en pente < 30°</td><td colspan="2">Sol d'assise avec forte pente ≥ 30°</td></tr>
<tr><td>Dimension de la semelle ≥ 0,3H m</td><td>Dimension inconnue</td><td>Fondation en redans[69] sur rocher ou fondation horizontale sur sol meuble</td><td>Fondation sur rocher sans adaptation[70] ou fondation sans information</td></tr>
<tr><td>Types 1 et 2</td><td>0</td><td>+3</td><td>0</td><td>+15</td></tr>
<tr><td rowspan="2">v32</td><td colspan="4">Inclinaison de la base de la fondation</td></tr>
<tr><td>Inclinaison favorable[71]</td><td>Aucune information</td><td colspan="2">Absence</td></tr>
<tr><td>Types 1 et 2</td><td>-6</td><td colspan="3">0</td></tr>
<tr><td rowspan="3">v33</td><td colspan="4">Renforts fonctionnels en pied du mur (longrine de protection, enrochements...)</td></tr>
<tr><td colspan="2">oui</td><td colspan="2">non</td></tr>
<tr><td colspan="2">-6</td><td colspan="2">0</td></tr>
<tr><td colspan="5">Résistance géotechnique en pied fragilisée</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Types 1 et 2
v34</td><td colspan="4">Affouillement ou Ravinement avérés</td></tr>
<tr><td colspan="2">2E</td><td colspan="2">3 et 3U</td></tr>
<tr><td colspan="2">+6</td><td colspan="2">+15</td></tr>
</table>

Tableau 7 : Système de notation de la vulnérabilité à la « Résistance géotechnique en pied défaillante »

69 Difficulté de statuer sur la dimension de la fondation en présence de redans.

70 Pour pallier le sol d'assise en pente.

71 C'est-à-dire une base de fondation inclinée selon une pente descendante vers l'arrière du mur.

Chapitre 6

Étape 3.3 : Gravité des conséquences

Ce chapitre, troisième partie de l'analyse simplifiée des risques, s'intéresse aux conséquences socio-économiques d'une ruine ou inaptitude du mur. La gravité des conséquences est évaluée selon la méthodologie proposée dans le guide « Maîtrise des risques – Application aux ouvrages d'art » [1] et repose sur des critères socio-économiques[72] :

- **l'importance de l'itinéraire associé à l'ouvrage (c1)**, qui comprend la valeur stratégique de l'itinéraire ;
- **l'importance du trafic de la voie ou des voies (c2)** ;
- **la valeur patrimoniale de l'ouvrage (c3)**, qui est associée aux coûts de la construction ou des réparations, dépendant de sa hauteur et de sa surface ;
- **les conséquences sur le niveau de service (c4)**, pendant les travaux de réparation ou de remplacement de l'ouvrage sur l'exploitation de l'itinéraire et sur la zone affectée par la ruine.

Les seuils indiqués, notamment pour les critères c1 et c2, décrits ci-après, ont été fixés pour les gestionnaires du réseau national non concédé. Naturellement, les **autres gestionnaires** peuvent les adapter en regard de la classification en place sur leur réseau et des trafics qu'il supporte.

6.1 - L'importance de l'itinéraire concerné par le mur

Le critère retenu : L'importance de l'itinéraire concerné par le mur est déterminée en fonction du niveau stratégique de la voie (ou des voies) qu'il permet de desservir :

- **les itinéraires très stratégiques** : par exemple les tronçons à forts enjeux stratégiques, les itinéraires de convois exceptionnels très fréquentés, les itinéraires de desserte d'un site d'importance stratégique (centrale électrique, hôpital régional, aéroport international...) ;
- **les itinéraires stratégiques** : tronçons inter-urbains à enjeux moins importants ;
- **les autres itinéraires** (peu ou assez stratégiques) : itinéraires qui présentent une importance stratégique secondaire.

Le critère aggravant : La valeur stratégique du mur peut être augmentée pour tenir **compte de l'environnement proche de l'ouvrage et des conséquences de sa ruine**. Il peut s'agir d'un ouvrage supportant un réseau d'intérêt national (gaz, électricité), d'un ouvrage supportant ou protégeant une ligne ferroviaire ou une autoroute, d'un ouvrage intégré à un échangeur routier stratégique, ou d'un enjeu particulier propre au gestionnaire (par exemple un enjeu touristique fort).

6.2 - L'importance du trafic

Le critère retenu : les quatre seuils de trafic[73] considérés sont :

- trafic inférieur ou égal à 15 000 véhicules/jour ;
- trafic compris entre 15 000 et 35 000 véhicules/jour ;
- trafic compris entre 35 000 et 80 000 véhicules/jour ;
- trafic supérieur à 80 000 véhicules/jour.

Nota : Si le mur protège et soutient des voies différentes, les trafics de chaque voie doivent être additionnés.

72 Les conséquences humaines ne sont pas prises en compte directement car non discriminantes (car de même niveau d'inadmissibilité), mais indirectement par le trafic.

73 Ces seuils ne s'avèreront pas discriminants pour les murs en maçonnerie mais ont été choisis pour l'ensemble des infrastructures du réseau routier non concédé. Néanmoins, ils pourront être modifiés par le gestionnaire au besoin.

6.3 - L'importance patrimoniale de l'ouvrage

Le critère retenu : Le coût de la réparation ou du remplacement du mur va dépendre de la **surface de parement** vue et de la hauteur maximale. Trois seuils de surface de parement vue :

- surface inférieure ou égale à 200 m² ;
- surface comprise entre 200 m² et 500 m² ;
- surface supérieure à 500 m².

Le critère aggravant : **L'importance de la hauteur** est considérée comme un critère aggravant à partir de 5 m :

- hauteur comprise entre 5 et 8 m ;
- hauteur supérieure à 8 m.

6.4 - L'impact sur le niveau de service

Le critère retenu : **L'impact potentiel sur le niveau de service** (arrêt ou diminution du trafic) pendant les travaux de réparation ou de remplacement de l'ouvrage sur l'exploitation de l'itinéraire et sur la zone affectée par la ruine. Trois catégories sont considérées :

- impact faible ;
- impact moyen ;
- impact fort.

Pour évaluer ces impacts, on peut notamment considérer les éléments d'appréciation suivants :

- **l'éloignement des voies par rapport au mur** – un éloignement important et une hauteur faible de soutènement peuvent éventuellement éviter la fermeture de l'ensemble des voies circulées, moyennant des dispositions assurant la sécurité du trafic (alternat, neutralisation de voies...) ;
- la possibilité et l'importance, en terme d'exploitation, d'une **déviation** de la section de route (*Note*) où est situé l'ouvrage – Plusieurs routes sont éventuellement concernées pour dévier le trafic ;
- la **sensibilité socio-économique des constructions** situées dans la zone affectée par l'effondrement éventuel de l'ouvrage : habitations, écoles, terrains de sport... ;
- le risque de **présence humaine** courante dans la zone affectée par l'effondrement éventuel de l'ouvrage (cours d'ensembles d'habitation, d'écoles, terrain de sport, rue pietonne...).

Note : Dans cette évaluation, il faut faire la distinction entre les déviations possibles pour les véhicules légers et les poids lourds, et ce en fonction de leur niveau d'impact (par exemple dans le cas des poids lourds, l'absence de déviation peut avoir un impact sur l'activité économique).

Les critères aggravants : Le fait qu'une **déviation** soit très pénalisante[74] ou impossible est considéré comme un critère aggravant. Lorsque l'alternat est possible, les conséquences sont moins graves.

74 Car beaucoup plus longue que l'itinéraire concerné ou de nettement moins bonnes caractéristiques routières par rapport au trafic à dévier.

6.5 - Évaluation du niveau de conséquences

Le système de notation du Tableau 8 est utilisé pour évaluer les conséquences : C = c1 + c2 + c3 + c4.

Les critères aggravants viennent se rajouter à la notation de base.

Importance de l'itinéraire					
	Itinéraire				
	Peu stratégique	Assez stratégique	Stratégique	**Critère aggravant :** Enjeu particulier	
c1	+1	+2	+3	+1	
Importance du trafic					
	Trafic < 15 000 v/j	15 000 v/j < T < 35 000 v/j	35 000 v/j < T < 80 000 v/j	T > 80 000 v/j	
c2	0	+2	+3	+5	
Importance de l'ouvrage					
	Surface < 200 m²	200 < S < 500 m²	S ≥ 500 m²	**Critères aggravants :** Hauteur importante du mur	
				Entre 5 et 8 m	> 8 m
c3	0	+2	+3	+1	+2
Impact sur le niveau de service					
	Faible	Moyen	Fort	**Critères aggravants :** Déviation impossible	
				Alternat possible	Alternat impossible
c4	0	+2	+4	+2	+5

Tableau 8 : Système de notation relatif au niveau de gravité des conséquences

Chapitre 7

Étape 3.4 : Évaluation du niveau de risque

Il s'agit dans ce chapitre de déterminer le niveau des aléas, des vulnérabilités, de la criticité et des conséquences, puis d'établir le risque, d'une part par scénario de ruine, puis pour l'ouvrage.

Nota : Le niveau de risque est évalué par type de murs maçonnés (Type 1 ou 2).

7.1 - Évaluation du niveau des aléas globaux

Chaque aléa est évalué en additionnant les « points » donnés pour chacun des critères, puis classé en trois niveaux (faible, moyen et fort). Le Tableau 9 renseigne sur les niveaux d'aléas pour les murs de Type 1 (maçonnerie sèche) et de Type 2 (maçonnerie jointoyée).

Note des aléas	**A1** « Agressivité du milieu »		**A2** « Augmentation des sollicitations sur le mur »		**A3** « Résistance géotechnique en pied défaillante »	**Niveaux d'aléas**
	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2	Type 1 et Type 2	
A ≤	3	7	16	34	9	Faible
< A ≤	3-6	7-14	16-32	34-68	9-18	Moyen
A >	6	14	32	68	18	Fort

Tableau 9 : Niveaux d'aléas

Exemple : variation de cotation de l'aléa « Résistance géotechnique en pied défaillante » (A3) entre la « procédure rapide » et la « procédure plus longue »

Le mur considéré n'a pas fait l'objet de travaux en pied (a31=0), présente une forte pente en aval (critère aggravant de a32, soit +3). Les notes IQOA en contrebas du mur, sur la zone d'influence (a32) et celle sur le drainage (a33) n'ont pas été renseignées. Dans le cadre de la **« procédure rapide »**, on obtient un aléa de niveau moyen pour la résistance en pied.
Dans le cas où le dossier d'ouvrage peut être consulté et qu'une nouvelle visite de l'ouvrage peut avoir lieu (**« procédure plus longue »**) permettant de lever les incertitudes : le dossier d'ouvrage fait référence à un changement de profil défavorable du profil du terrain (a31=5), la note IQOA de la zone d'influence est 3U (a32= +8+3). En ce qui concerne la présence d'eau à l'aval du mur (a33), on va pouvoir dans le cas le plus favorable descendre à un niveau faible, mais dans le cas le plus défavorable, monter à un niveau de risque fort !
Comme pour toute méthode, la qualité des données est primordiale.

Cotation / Aléas		a31	a32	a33	Total	
« Procédure rapide »		0	+6 +3	+3	12	Moyen
« Procédure plus longue »	Plus favorable	5	0 +3	0	8	Faible
	Moins favorable		+8 +3	+4	20	Fort

7.2 - Évaluation du niveau des vulnérabilités globales

Comme pour les aléas, chaque vulnérabilité est évaluée en additionnant les « points » donnés pour chaque critère, puis classée selon trois niveaux (faible, moyen, fort). Le Tableau 10 renseigne sur le niveau des vulnérabilités pour les murs de Type 1 (maçonnerie sèche) et de Type 2 (maçonnerie jointoyée).

Note des vulnérabilités	**V1** « Agressivité du milieu »		***V2*** « Augmentation des sollicitations sur le mur »		**V3** « Résistance géotechnique en pied défaillante »	**Niveaux des vulnérabilités**
	Type 1	Type 2	Type 1	Type 2	Type 1 et Type 2	
V ≤	5	10	10	14	10	Faible
< V ≤	5-10	10-20	10-20	14-28	10-20	Moyen
V >	10	20	20	28	20	Fort

Tableau 10 : Niveaux de vulnérabilité

Exemple : variation de cotation de la vulnérabilité à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur » (A4) entre la « procédure rapide » et la « procédure plus longue »

Le mur de Type 2 (maçonnerie jointoyée), de 5 mètres de hauteur, soutient la voie de circulation située à un mètre de la tête du mur (v24=+10). Les notes IQOA sur la « structure – mouvement, déformations » et sur le « drainage interne du mur – désordres sur le parement » n'ont pas été renseignées (v21=+11 et v22=+5). Dans le cadre de la **« procédure rapide »**, on obtient une vulnérabilité de niveau moyen pour l'augmentation des sollicitations en tête. Si maintenant, une nouvelle visite de l'ouvrage **(« procédure plus longue »)** permet de lever les incertitudes, on pourrait dans le cas le plus favorable descendre à un niveau faible, mais dans le cas le plus défavorable, monter à un niveau de risque fort !

Cotation / Aléas		v21	v22	v23	v24	Total	
« Procédure rapide »		+11	+5	+2	+10	27	Moyen
« Procédure plus longue »	Plus favorable	0	0	+2	+10	12	Faible
	Moins favorable	+15	+7	+2	+10	34	Fort

7.3 - Évaluation du niveau de criticité

Nous avons considéré deux types de rupture, qui conduisent à différents scénarios (Figure 22) :

1) La perte de stabilité externe, conduisant au poinçonnement/renversement ou au glissement du mur dans sa globalité sur sa base, liée :

- **à certains aléas**, c'est-à-dire aux conditions d'exposition et d'utilisation :
  - l'aléa A2 « Augmentation des sollicitations sur le mur » entraînant des contraintes excessives sur le sol de fondation (§ 4.2),
  - l'aléa A3 « Résistance géotechnique en pied défaillante » consistant à une modification de l'environnement modifiant la résistance du sol (§ 4.3),
- **aux vulnérabilités de l'ouvrage par rapport à ces aléas**, ayant pour origine son état ou sa conception et traduisant son comportement structural :
  - la vulnérabilité V2 à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur » traduisant une poussée des terres sous-estimée (§ 5.2),
  - la vulnérabilité V3 à la « Résistance défaillante en pied » représentant une perte de résistance au pied de l'ouvrage (§ 5.3).

2) La perte de stabilité interne, entraînant la rupture de l'ouvrage, qui peut être favorisée par :

- **des aléas**, conduisant à la perte de résistance de l'ouvrage :
  - l'aléa A1 « Agressivité du milieu » (§ 4.1),
  - l'aléa A2 « Augmentation des sollicitations sur le mur » (§ 4.2),
- **des vulnérabilités de l'ouvrage par rapport à ces aléas** en raison de défauts de conception de l'ouvrage ou d'une sensibilité accrue en raison de l'état du mur :
  - la vulnérabilité V1 à l'« Agressivité du milieu » (§ 5.1),
  - la vulnérabilité V2 à l'« Augmentation des sollicitations sur le mur » (§ 5.2).

Nota : **La perte de stabilité globale**, qui correspond à un phénomène de grand glissement et n'est pas propre à l'ouvrage. Elle n'est pas traitée dans ce guide, mais certains points d'alerte sont présentés pour aider le gestionnaire à l'identifier.

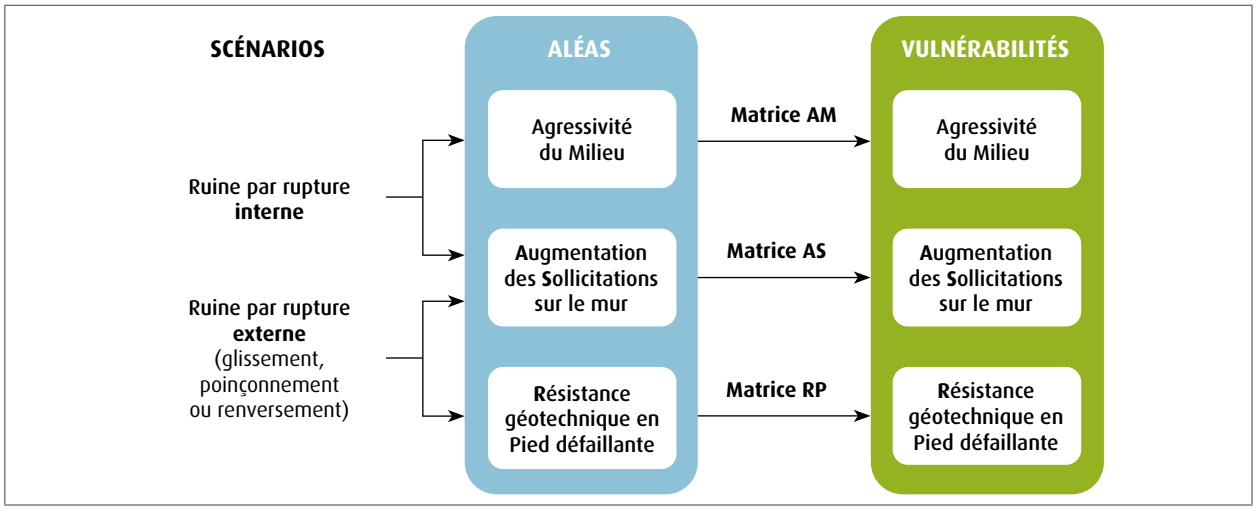


Figure 22 : Les différents scénarios considérés

Démarche pour déterminer le niveau de criticité :

1) Estimation des matrices de criticité pour chaque binôme aléa/vulnérabilité : le niveau de criticité résulte du croisement de l'aléa et de la vulnérabilité, on obtient ainsi : les matrices de criticité « AM » (Agressivité du Milieu), « AS » (Augmentation des Sollicitations sur le mur) et « RP » (Résistance geotéchnique en Pied défaillante) en utilisant le Tableau 11.

Niveau de criticité élémentaire		Niveau de vulnérabilité		
		Faible	**Moyen**	**Fort**
Niveau d'aléa	**Faible**	Criticité Faible	Criticité Faible	Criticité Moyenne
	Moyen	Criticité Faible	Criticité Moyenne	Criticité Elevée
	Fort	Criticité Moyenne	Criticité Elevée	Criticité Elevée

Tableau 11 : Matrice de criticité par scénario

2) Estimation de la criticité globale couvrant les trois criticités élementaires autour des deux scénarios, obtenue en appliquant le Tableau 12.

Niveau de criticité du scénario		Niveau de criticité pour un binôme « aléa/vulnérabilité »		
		Faible	**Moyen**	**Élevé**
Niveau de criticité pour un binôme « aléa/ vulnérabilité »	**Faible**	Criticité Faible	Criticité Moyenne	Criticité Elevée
	Moyen	Criticité Moyenne	Criticité Elevée	Criticité Elevée
	Elevé	Criticité Elevée	Criticité Elevée	Criticité Elevée

Tableau 12 : Niveaux de criticité pour chaque scénario de ruine

Comme présenté sur la Figure 22 :

- **pour le scénario « Rupture Interne »**, on croise la criticité élémentaire « AM » (Agressivité du Milieu) et la criticité élémentaire « AS » (Augmentation des Sollicitations sur le mur) ;
- **pour le scénario « Rupture Externe »** (glissement, poinçonnement, renversement), on croise la criticité élémentaire « AS » (Augmentation des Sollicitations sur le mur) et la criticité élémentaire « RP » (Résistance géotechnique en Pied défaillante).

7.4 - Évaluation du niveau de gravité des conséquences

Trois niveaux de gravités des conséquences sont définis dans le Tableau 13 :

Gravité des conséquences – C = c1 + c2 + c3 + c4 (selon le Tableau 8)	
Note des gravités des conséquences	**Niveaux des gravités des conséquences**
C < 6	Faible
6 ≤ C < 12	Moyen
C ≥ 12	Elevé

Tableau 13 : Niveaux de gravité des conséquences

7.5 - Évaluation du niveau du risque

L'évaluation du risque pour l'ouvrage est réalisée selon deux étapes :

1) **Estimation du niveau de risque pour chaque scénario**: elle résulte du croisement du niveau de criticité et celui des conséquences selon le Tableau 14. La composante technique n'est plus le seul paramètre de décision, la valeur socio-économique du mur intervient pour l'estimation du niveau de risques et la classification des ouvrages.

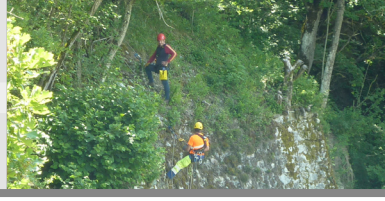
		Niveau de conséquences		
		Faible	**Moyen**	**Élevé**
Niveau de criticité	**Faible**	Risque Faible	Risque Faible	Risque Moyen
	Moyen	Risque Faible	Risque Moyen	Risque Fort
	Elevé	Risque Moyen	Risque Fort	Risque Fort

Tableau 14 : Niveaux de risque par scénario

2) **Estimation du niveau de risque pour l'ouvrage :** les 2 scénarios de ruine sont au même niveau et indépendants, par contre le risque est plus grand, statistiquement parlant, avec un cumul de niveaux de risque. Il s'agit ici de pouvoir classifier les ouvrages (Tableau 15).

		Niveau de risque du scénario « Ruine par perte de stabilité externe »		
		Risque Faible	**Risque Moyen**	**Risque Fort**
Niveau de risque du scénario « Ruine par rupture interne »	**Risque Faible**	Risque Faible	Risque Moyen	Risque Fort
	Risque Moyen	Risque Moyen	Risque Fort	Risque Fort
	Risque Fort	Risque Fort	Risque Fort	Risque Très Fort

Tableau 15 : Niveaux de risque pour l'ouvrage



Chapitre 8

Éléments de traitement des risques

La méthodologie d'analyse des risques participe à la gestion globale d'un patrimoine ou d'une partie de patrimoine face à un risque identifié, mais peut également constituer **un outil d'aide à la gestion d'un ouvrage donné**.

La gestion grâce à l'analyse des risques simplifiée est complémentaire de celle du classement IQOA. Ces deux classements sont supposés à jour : l'analyse des risques est un processus actualisé et optimisé en fonction de l'évolution des données utilisées (cotations IQOA, âge, typologie...) et de l'efficacité des actions entreprises.

Dans tous les cas, il appartient au gestionnaire de fixer la politique de surveillance de son patrimoine et de décider des éventuelles mesures d'exploitation que l'état du mur de soutènement peut nécessiter.

8.1 - Sélection des risques

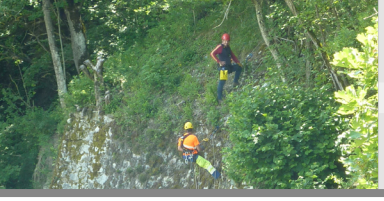
La sélection des risques consiste à orienter le gestionnaire vers les actions à entreprendre suite à l'identification des risques. Cette sélection des risques est décrite dans la Figure 23 et les différentes missions auxquelles il est fait référence sont présentées par la suite (*cf.* § 8.1.1 sur l'inspection détaillée, § 8.1.2 sur les actions de surveillance, § 8.1.3 sur les examens des aléas, des vulnérabilités et des conséquences et § 8.1.4 sur l'analyse des risques détaillées).

On rappelle les deux définitions :

- **la « Procédure rapide »**, où certains critères ont été évalués comme « Aucune information » ou « Non évalué (NE) »[75], faute d'obtention rapide de l'information . Si le nombre de critères qui ne peuvent être évalués devient trop important ou si un critère se révèle très impactant sur le niveau de risque, il convient de s'orienter vers la procédure « plus longue ». ;
- **la « Procédure plus longue »**, permettant d'évaluer plus finement ces critères non déterminés en première démarche, en recherchant certaines données, comme par exemple, celles contenues dans le dossier d'ouvrage[76].

75 Dans le cas d'une évaluation selon l'IQOA.

76 Il peut être instructif de se référer à des dossiers d'ouvrages similaires et réalisés durant la même période.



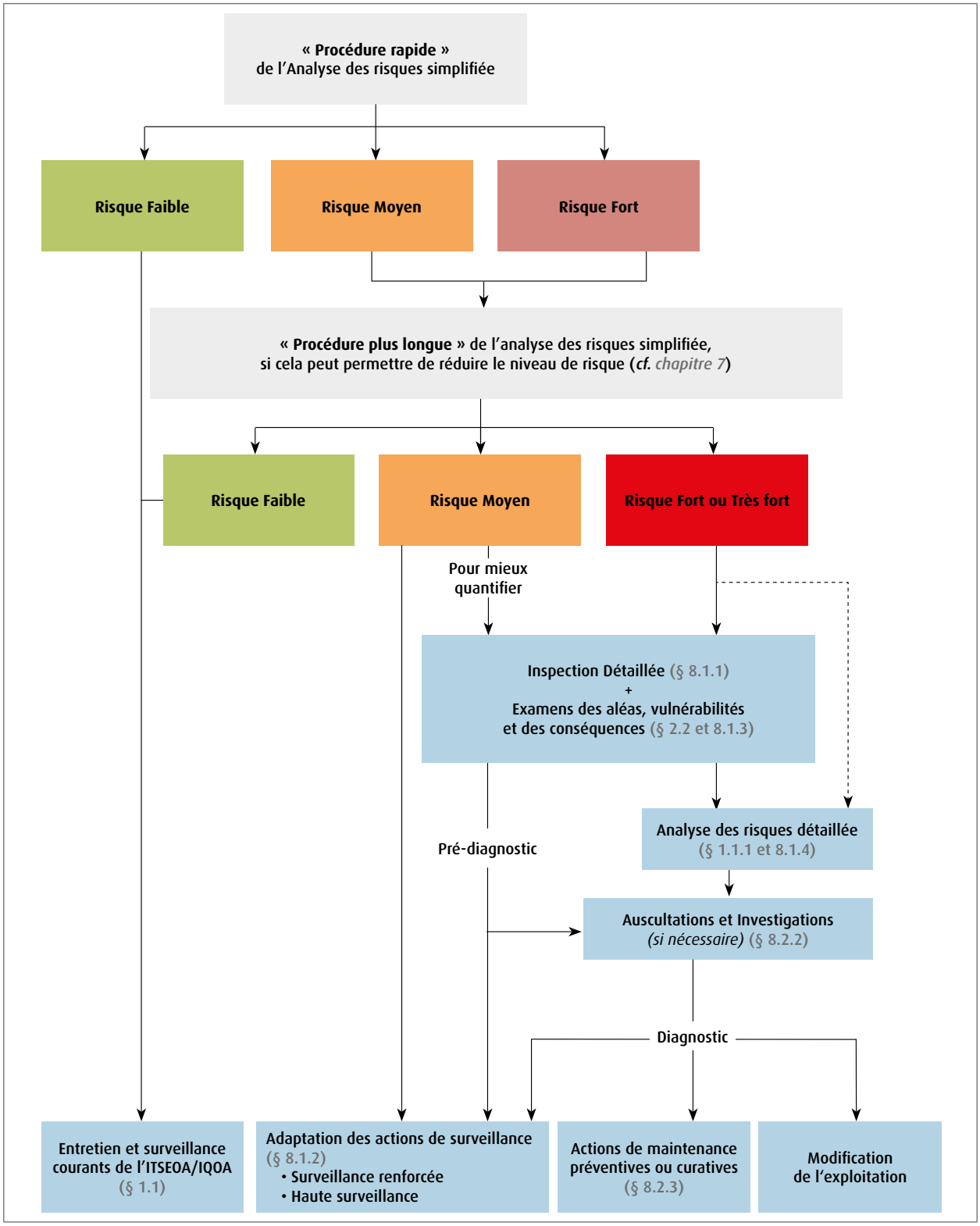
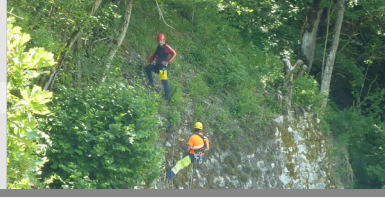


Figure 23 : Organigramme du traitement du risque



8.1.1 - Inspection détaillée

L'inspection détaillée est définie dans le fascicule 2 de l'ITSEOA [14] et dans le guide méthodologique « IQOA-Murs » [10]. En résumé, elle doit constituer un « bilan de santé » apparent de l'ouvrage au travers d'un examen visuel[77] en contact avec la structure (à l'aide de moyens d'accès appropriés), et si besoin être complétée par des auscultations ou des mesures pour aboutir au bon diagnostic.

Cette inspection détaillée peut être orientée par les résultats de l'analyse des risques simplifiée.

Concernant les murs en eau, afin de lever les incertitudes au niveau des fondations, l'inspection devra être complétée par une visite subaquatique, réalisée par une équipe de plongeurs (en se basant sur l'application du fascicule 10 de l'ITSEOA sur les fondations en site aquatique [22]) ou par des auscultations par mise à sec des fondations.

8.1.2 - Les actions de surveillance

En fonction de la présence de désordres, d'aléas ou de vulnérabilités spécifiquement identifiés comme prépondérants pour un ouvrage, des modalités de surveillance particulières doivent être appliquées au cas par cas, temporairement ou définitivement en fonction de la possibilité de mettre en œuvre ou non des actions de maintenance :

- **modifications de la périodicité des actions de surveillance prévues par l'ITSEOA** ;
- **instrumentation** (mesures de déplacements, d'angles...) ;
- **prélèvements pour analyses**...

En cas de nécessité, le gestionnaire doit adopter toute mesure d'exploitation ou de surveillance qu'il considère adaptée à l'impératif de sécurité des usagers et des tiers.

Dans certaines conditions, à vérifier systématiquement, l'instruction technique peut conduire à appliquer les modalités relatives à la surveillance renforcée ou à la haute surveillance[78]. Ces mesures sont définies dans le fascicule 03 de l'ITSEOA [15].

8.1.3 - Examens des aléas, des vulnérabilités et des conséquences

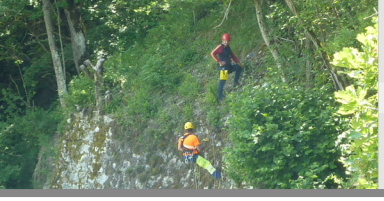
Sur un ouvrage donné, l'application d'une méthode d'analyse des risques permet d'identifier, tant au niveau des aléas que des vulnérabilités, des points de faiblesse dont il est alors parfois possible de diminuer l'occurrence ou l'importance des conséquences par des actions de maintenance préventive adaptées, comme l'entretien des barbacanes, l'élimination des pousses arbustives...

8.1.4 - Analyse des risques détaillée

Si la méthodologie générale introduit la possibilité de réaliser une **analyse des risques détaillée** (*cf.* § 2.3.5 de [1]) à l'issue de l'application de la méthodologie simplifiée (§ 1.1), il convient de considérer que, dans les cas les plus fréquents, l'analyse des risques simplifiée combinée avec un relevé par un spécialiste de l'état visuel des désordres de l'ouvrage permet d'envisager des suites pertinentes. Ainsi l'analyse détaillée des risques doit rester très exceptionnelle et n'être utilisée que si elle permet de mieux appréhender le niveau de risque.

77 Dans le cas d'ouvrages du réseau routier national, l'inspection doit être dirigée par un agent ayant suivi une formation qualifiante de chargé d'études en inspection d'ouvrage, que ce soit en site terrestre ou subaquatique [14].

78 La « haute surveillance » n'est pas toujours réalisable en raison de rupture fragile du mur, pour laquelle l'instrumentation ne pourra pas fournir l'information d'alerte.



8.2 - Traitement du risque

8.2.1 - Deux axes de traitement du risque

Dans le cadre du traitement du risque, on peut considérer deux axes de traitement du risque pour les ouvrages à risque fort :

- **l'évitement ou la réduction de l'impact des aléas** identifiés comme importants pour l'ouvrage considéré, lorsque c'est possible (Note) ;
- **un examen des vulnérabilités et des solutions structurales** permettant de les corriger.

Note : S'il est bien évidemment difficile d'agir sur l'aléa relatif aux conditions d'exploitation de la route, des actions sont possibles par exemple en réalisant une déviation ou en adaptant la circulation sur l'ouvrage (restrictions de circulation et de tonnage des poids lourds ou passages alternés).

8.2.2 - Les investigations et l'instrumentation

Les résultats des investigations et des instrumentations ont pour objectif l'étude du comportement de l'ouvrage en vue d'un diagnostic aboutissant à une réparation. Le report de ces essais sur un plan topographique est primordial.

Investigations

Si elles se révèlent nécessaires, les investigations visent à permettre d'établir un diagnostic fiable de l'ouvrage et la production d'un Avant-Projet de Réparation d'Ouvrage d'Art (APROA). Elles peuvent correspondre à (liste non exhaustive) :

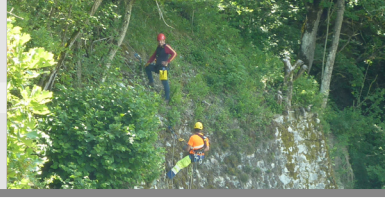
- **des études de caractérisation des matériaux** (caractéristiques dimensionnelles et mécaniques, états de dégradation...) ;
- **des études de caractérisation de la zone d'influence** (caractéristiques géotechniques, des écoulements hydrauliques...).

Le Tableau 16 présente en fonction du type d'**investigation**, les informations obtenues. Un certain nombre de ces essais sont présentés sous forme de fiche dans les cahiers interactifs « Auscultation des ouvrages d'art » réalisés par l'IFSTTAR et le Cerema [23].

Instrumentation

Le Tableau 17 propose des exemples **d'instrumentions de l'ouvrage** qui sont parfois mises en œuvre dans le cadre de mise en surveillance renforcée ou sous haute surveillance (Figure 24), pour lesquels il faut être attentif à l'adéquation entre la plage de mesure visée et la sensibilité du matériel utilisé. La connaissance de l'évolution des valeurs de ces mesures dans le temps est prépondérante, ce qui implique de fournir une période et une fréquence de ces dernières.

Nota : Les cahiers des charges de mise en œuvre d'investigations et d'instrumentations doivent être élaborés par un spécialiste de ces thématiques.



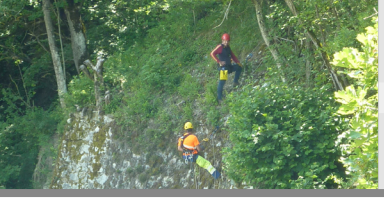
Types d'essais	Informations obtenues
Essais directs	
Essais mécaniques *in-situ* (pressiomètre, pénétromètre)	• caractéristiques des sols de fondation (capacité portante)
• A partir d'une carotte ou d'un prélèvement	
• De mortier :	
Analyse au MEB (Microscope Electronique à Balayage)	• caractéristiques de la microstructure, présence de produits d'altération
Essais mécaniques	• résistance mécanique du matériau composite pierre ou brique/ mortier (complexe)
Analyse chimique élémentaire du mortier	• dosage des éléments constitutifs et de la nature du liant
Analyse chimique élémentaire du mortier	• profils de pénétration des chlorures, du magnésium et des sulfates dans la maçonnerie
• Des blocs :	
Caractéristique minéralogique	• analyse mécanique et chimique élémentaire
Fracturation de la maçonnerie	• Indice RQD[79]
Essais de compression simple	• résistance à la compression des blocs
• De sol :	
Essais d'identification	• nature des sols
Essais mécaniques (triaxial ou boîte de cisaillement)	• caractéristiques mécaniques de cisaillement[80] des sols
• De sol et d'eau :	
Analyses chimiques[81]	• agents agressifs dans l'eau ou dans les sols
Autres :	
Percement de la maçonnerie	• épaisseur du mur
Fil à plomb	• mesure de dévers
Mesures diverses : relevés topographiques, photogramétrie...	• mouvements du parement • mouvements du sol
Méthodes Contrôle Non Destructif (CND) Radar	• géométrie des murs
Suivi photographique ou suivi scan 3D	• renversement du mur et/ou glissement • affouillement (si assèchement du cours d'eau en période sèche) • disjointoiement (Figure 19), désorganisation de maçonnerie (Figure 8c), cavités
Infrarouge	• zones d'humidité
Sondage à la pelle en pied de mur	• niveau de fondation • indications sur le sol d'appui • présence de nappe ou d'arrivées d'eau
Sondage à la pelle en arrière du mur	• présence de nappe ou d'arrivées d'eau • certaines indications de la géométrie du mur • nature et stratigraphie du remblai à l'arrière du mur
Prospections sismiques	• stratigraphie du sol en pied de mur, en particulier le niveau du toit rocheux

Tableau 16 : Exemples de types d'essais d'investigation avec la nature des informations obtenues

79 Standard Test Method for Determining Rock Quality Designation of Rock Core (ASTM D 6032/D 6032M). RQD = somme de la longueur des échantillons de forage supérieurs à 10 cm / longueur totale du forage.

80 La cohésion « c » et l'angle de frottement interne « φ ».

81 FD P18-011 « Béton — Définition et classification des environnements chimiquement agressifs — Recommandations pour la formulation des bétons ».



Types d'instrumentation	Informations obtenues
Piézomètre (ouvert ou fermé[82])	• niveau de la nappe ou pression interstitielle
Capteur de pression[83]	• contraintes dans le sol ou poussées à l'arrière du soutènement
Pose de nivelles ou niveaux à bulle	• inclinaison du parement
Appareil de mesure de déformation tridimensionnelle (théodolite, laser, méthode « 3D » géomètres...)	• mouvements du parement
Pose de tassomètre	• tassements
Systèmes à fil invar tendu (distancemètre à fil invar)	• déplacements latéraux
Pose d'inclinomètres	• mouvements du parement[84] (rotation) • mouvements du sol de fondation amont ou aval
Fissurométrie par jauges ou extensomètres	• mesures dans le temps de l'ouverture et la fermeture des fissures

Tableau 17 : Exemples de types d'instrumentation avec la nature des informations obtenues

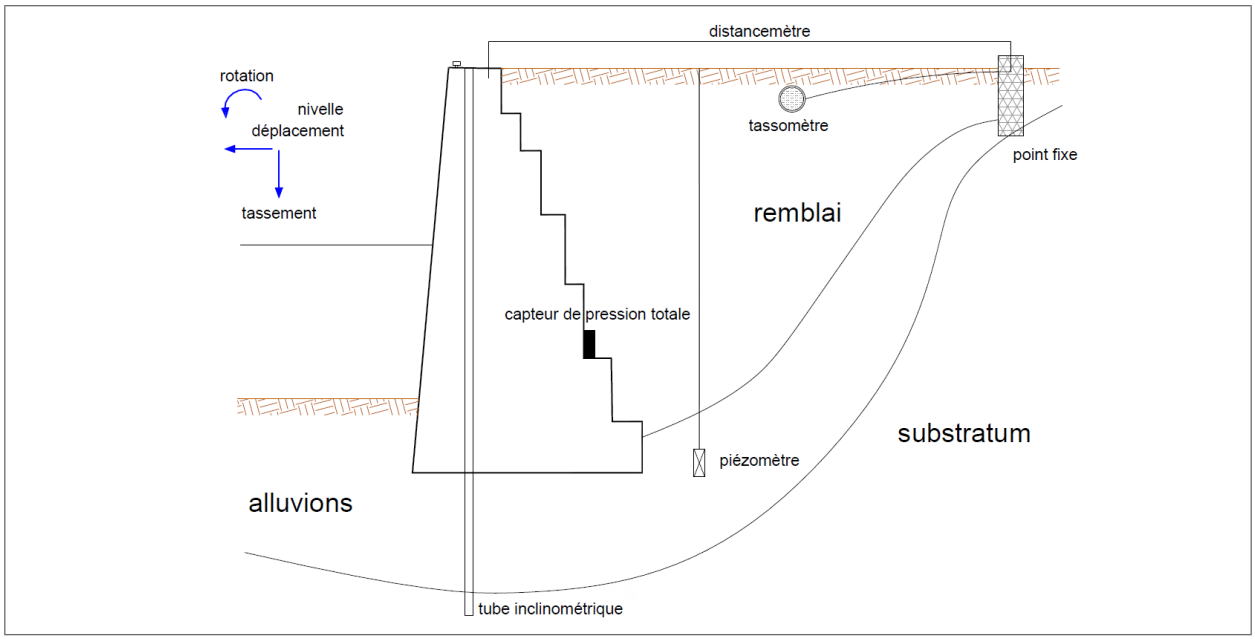


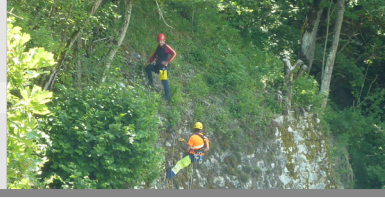
Figure 24 : Différents types de mesure pouvant être mis en œuvre [25]

On peut trouver un exemple de plan d'investigation d'un mur en maçonnerie permettant l'accostage et l'amarrage de bateaux de plaisance, ainsi que des tableaux généraux pour les murs en maçonnerie en zone portuaire reliant les désordres observés aux causes possibles et aux types d'investigations et d'instrumentations dans « Pathologies des ouvrages portuaires : méthodes d'investigation » du CETMEF [24].

82 Les piézomètres ouverts (constitués d'un simple tube crépiné) sont adaptés aux mesures dans les matériaux perméables, ceux fermés, plus complexes, pour les sols non perméables (argiles, vases).

83 « Leur pose, qui nécessite parfois des terrassements importants, doit être faite par des spécialistes. De telles mesures doivent être effectuées à bon escient car elles sont onéreuses et donnent parfois des informations assez sujettes à caution. » [25]. Elles risquent aussi de déstabiliser l'ouvrage.

84 Seulement si le tube est placé à l'extérieur contre le parement, ou encore scellé dans ce dernier, car les déformations sont faibles et de l'ordre de la précision des mesures.



8.2.3 - Les actions de maintenance préventives ou curatives

Les **suites à donner** ne sont pas systématiques et leur opportunité est à apprécier par le gestionnaire en particulier en regard de l'existence et/ou de l'évolution éventuelle de désordres, de la possibilité de rupture brutale en regard des aléas et des vulnérabilités identifiées par l'analyse simplifiée. Elles peuvent porter sur une **adaptation ou un renforcement des actions de surveillance ou encore sur la mise en œuvre d'investigation** pouvant alors déboucher sur des **actions de maintenance curatives ou préventives**.

L'action de maintenance préventive la plus fondamentale est **l'entretien courant**. En particulier, cette action peut permettre par exemple de s'assurer de l'état de fonctionnement du dispositif d'assainissement et de drainage. Cet entretien courant est obligatoire pour tous les ouvrages et *a fortiori* pour les ouvrages présentant un risque fort. Son importance ne doit pas être négligée.

Les **actions de maintenance curatives** découlent généralement de la constatation des désordres appréhendés donnée à l'issue de l'inspection détaillée. Cette dernière constitue donc un outil fondamental pour établir un pré-diagnostic, définir des actions de surveillance adaptées, des investigations éventuelles en vue d'un diagnostic et des actions de maintenance. Les ouvrages identifiés comme présentant un risque fort (ou très fort) doivent légitimement faire l'objet d'un tel examen par un spécialiste.

Indépendamment de l'existence de désordres visibles, les **actions de maintenance préventives**[85] sont difficiles à appréhender tant en ce qui concerne leur définition que leur opportunité ; la méthodologie d'analyse des risques est alors d'un apport considérable. En quantifiant les criticités des ouvrages, elle permet d'identifier les axes de maintenance préventive.

Les **actions de maintenance préventives ou curatives** (Tableau 18) peuvent être, non exhaustivement :

- **le renforcement de la structure** pour pallier les insuffisances éventuelles constatées (clous, tirants, contreforts...) ;
- **la réduction de l'impact des aléas** (amélioration de la gestion des eaux pour limiter l'impact du salage et/ou les arrivées d'eau accidentelles...) ;
- **le traitement de vulnérabilités** (amélioration du système de drainage...).

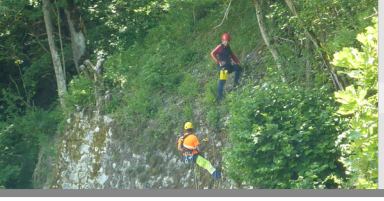
Ces différentes actions sont parfois conjuguées, selon les possibilités d'emprises foncières, les pathologies, le niveau de risque...

L'entretien

Un entretien adéquat permet de prévenir contre la ruine prématurée d'un mur de pierres sèches, on distingue :

- **l'entretien courant** qui consiste en :
  - la maîtrise de la circulation des eaux ;
  - l'enlèvement de toute végétation arbustive sauvage poussant dans le mur et à moins de deux mètres de ce dernier [18] ;
- **l'entretien spécialisé** qui réside en la réparation immédiate des parties de mur effondrées et le remplacement des pierres dégradées.

85 Les actions de maintenance préventives :
- *campagne de dévégétalisation (3 m autour de la structure) ;*
- *campagne de rejointoiement pour les murs de Type 2.*



Actions visées	Types d'action
Restauration de la maçonnerie	
Protection du mur contre les agressions	• rejointoiement[86] • remplissage des vides par injection[87] des maçonneries afin d'en réduire la perméabilité (Figure 25)
Reconstruction partielle[88]	• remplacement[89] de blocs (Figure 26)
Augmentation de la résistance mécanique	• par injection[90] des maçonneries en rétablissant le monolithisme de la structure (Figure 25) ↘ Risques de déstabilisation de la maçonnerie lors de l'injection du coulis par les surpressions occasionnées ou par la réduction de frottement entre les blocs par la présence de ce milieu visqueux
Limiter les déformations du mur ou l'ouverture des fissures	• mise en œuvre de tirants (Figure 26), aiguilles, clous ou boulons[91]
Interventions du mur pour réduire les poussées côté amont	
Amélioration du dispositif d'évacuation des eaux, côté amont, et du drainage interne[92]	• imperméabilisation des surfaces • recueil et évacuation contrôlés des eaux • création de barbacanes (sondage destructif[93]) dans le cas de mur jointoyé • drains sub-horizontaux selon les conditions hydrogéologiques et contraintes d'aménagement du site • tout système permettant d'éviter l'apport d'eau (tranchées drainantes)
Diminution des sollicitations (déchargement amont du mur)	• déchargement suite à l'acquisition de terrains fonciers / de constructions avoisinantes, ou à une négociation avec les communes • substitution de sol avec mise en place de remblai (sol renforcé, matériaux allégés[94]) • éloignement de la voie portée • décaissement • recépage du mur
Interventions côté amont pour s'opposer au glissement, au renversement ou au basculement	
Diminution de l'inclinaison du talus côté aval	• réalisation de soutènements étagés • en s'intéressant aux zones d'influence • en effectuant un clouage en partie supérieure

[...]

86 cf. article 6.2.1 de la norme NF P95-107.

87 Constitué d'eau, de ciments, de chaux, de sables, d'adjuvants, de bentonite et de fumée de silice, et dont les caractéristiques sont la capacité de pénétrabilité, la stabilité, la résistance mécanique, la résistance au délavage et la résistance chimique. Ces matériaux utilisés pour le coulis d'injection doivent répondre aux spécifications de la norme NF P95-107. Les liants (chaux ou ciment) doivent être choisis après analyse des blocs afin d'éviter les attaques (cf. les actions physico-chimiques au § 3.4.3 « Les mortiers »).

88 cf. articles 6.2.2 et 6.3.5 de la norme NF P95-107.

89 Selon la norme NF P95-107 : « le remplacement doit se faire avec un matériau de même nature, dans la mesure où ce matériau convient à son emploi dans l'ouvrage et qu'il existe des sources d'approvisionnement. Dans le cas contraire, les qualités du matériau de substitution définissant les caractéristiques physiques et esthétiques et les modalités de réception doivent être précisées.

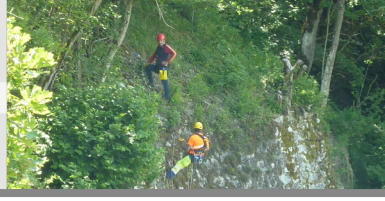
90 Cf. note de bas de page 87.

91 Selon la norme NF P95-107 (article 6.3.4), ces armatures peuvent être traversantes, scellées ponctuellement dans la maçonnerie ou scellées sur toute leur longueur. Elles peuvent être constituées par des barres, des câbles, des tiges filetées ou des boulons.

92 On peut aussi consulter le Guide FABEM 6.2, Réparation et renforcement des maçonneries – Réparation non structurale, édité par le STRRES [28].

93 L'usage du sondage destructif d'une structure en maçonnerie peut comporter des risques et il convient donc de prendre des précautions surtout si la maçonnerie est déjà dégradée ; le forage destructif au tricône nécessite une pression très forte d'injection d'eau et un couple de rotation important dès que le diamètre de forage devient supérieur à 60 mm. Il engendre aussi des vibrations importantes.

94 Copeaux de pneu, pouzzolanes, remblais de polystyrène, tous procédés pour alléger le sol (par exemple, avec des bidons de 200 l en plastique vides liaisonnés entre eux par un remplissage en coulis de ciment en agencement en nid d'abeille). Ces matériaux doivent présenter des paramètres de résistance (c, φ) plus forts et une masse volumique plus faible.



[...]

Confortement des fondations[95]	
Modification des fondations	• reprise en sous-œuvre (micropieux...)
Renforcement du sol de fondation[96]	• différents procédés d'amélioration des sols par apport de liant
Protection des fondations en milieu aquatique contre les affouillements	• enrochements (Figure 27), encagements, longrine de pied
Renforcement du soutènement pour s'opposer au renversement	
Renforcement du soutènement	• clouage, tirantage • liaisonnement par « tirants d'enserrement »[97] • mise en place de butons entre deux murs de part et d'autre de la voie

Tableau 18 : Exemples d'actions de maintenance curatives ou préventives

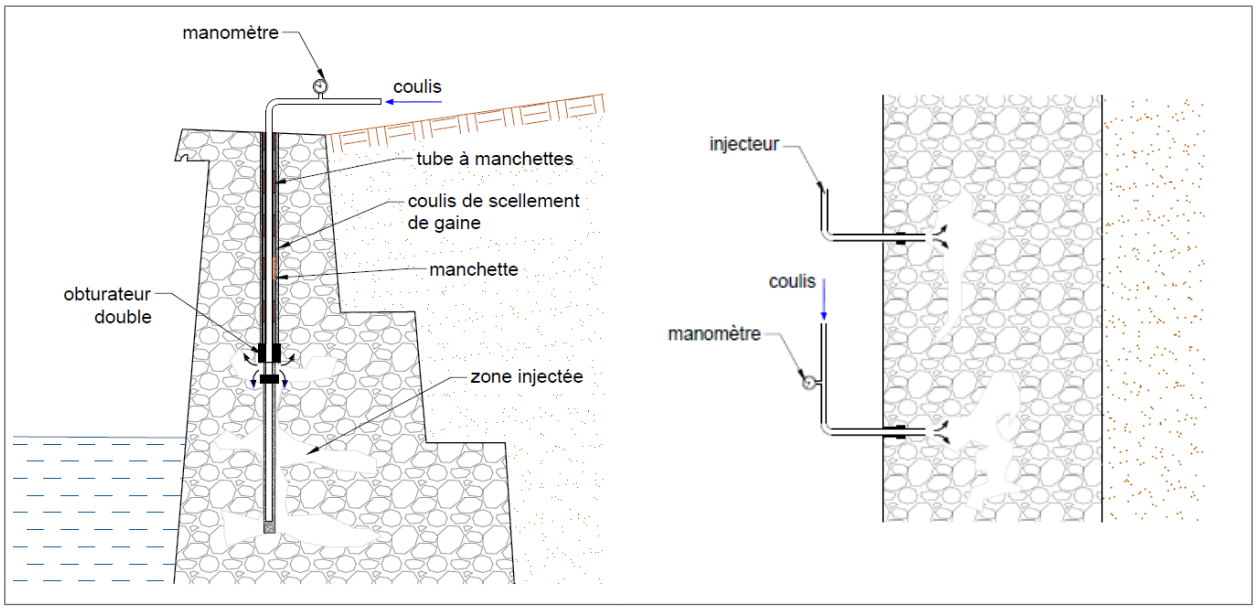
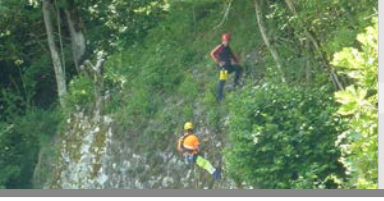


Figure 25 : Exemples d'injections [26]

95 On peut aussi consulter le Guide FABEM 6.3, Réparation et renforcement des maçonnerie – Réparation et renforcement structuraux, édité par le STRRES [27].

96 Très rarement, quand les enjeux sont très importants et dépassent le montant financier d'une déconstruction.

97 Un tirant d'enserrement relie deux murs en opposition de part et d'autre d'un remblai.



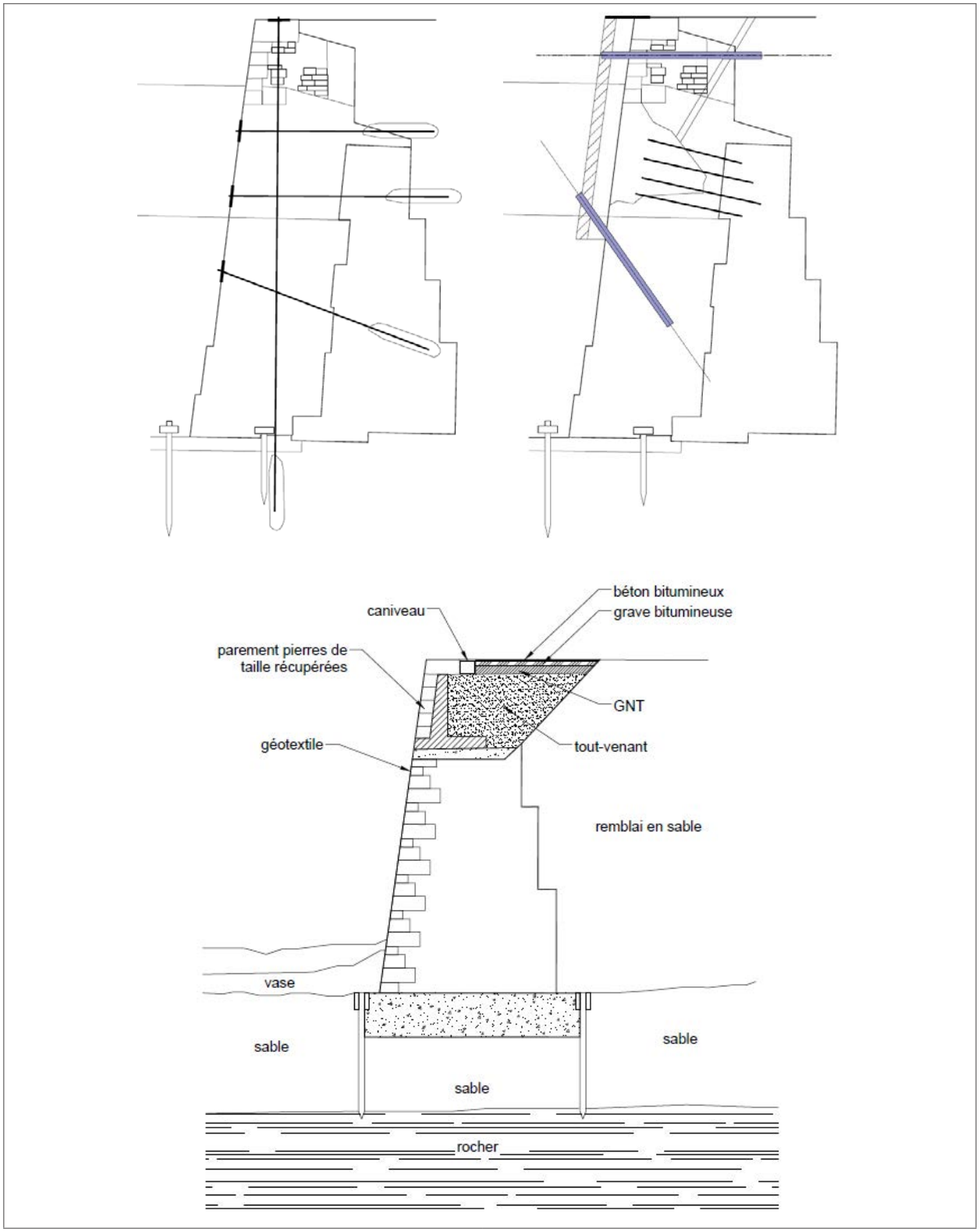


Figure 26 : Exemples de tirantage, substitution ou comblement partiel de la maçonnerie, démolition et reconstruction partielle [26]

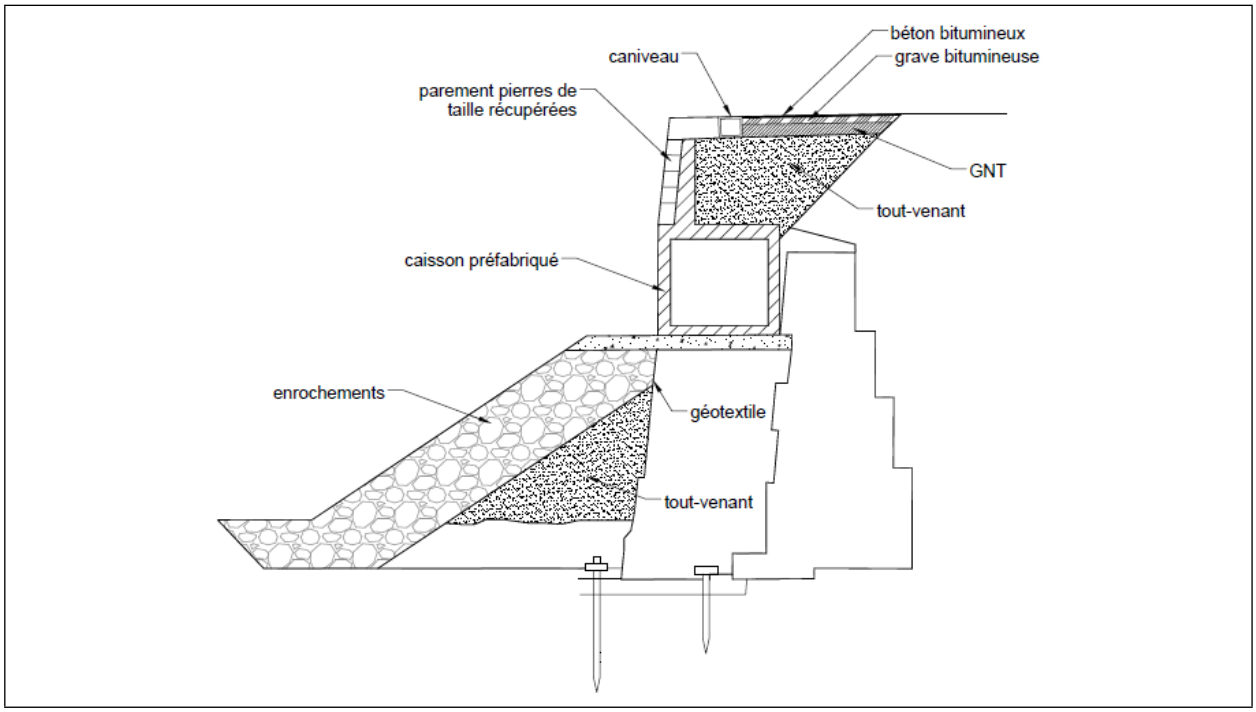


Figure 27 : Exemples de solutions mixtes [26]

Exemples d'actions préventives ou curatives inadaptées

Certaines actions conduisent à des effets néfastes pour l'ouvrage, par exemple :

- **le rejointoiement d'une maçonnerie hourdée à la chaux avec un mortier à base de ciment** : le mortier de ciment ayant des caractéristiques mécaniques élevées conduit à un point dur en parement pouvant être à l'origine de dégradations (par exemple, un effet de coin qui entraîne l'éclatement des pierres en bordure de joint) [17] ;
- **l'enduit à base de ciment sur une maçonnerie calcaire** qui en augmentant l'imperméabilisation du mur, crée un barrage étanche maintenant ainsi un taux d'humidité élevé propice à une accélération de l'altération de surface (*cf.* § 3.4.1 « les actions de l'eau ») par remontées capillaires ;
- **la réalisation d'un enduit rendant étanche un mur de pierres sèches**, provoquant ainsi une poussée hydrostatique sur le mur, en imperméabilisant ce dernier, pour laquelle l'ouvrage n'a pas été dimensionné.

Annexes

Annexe 1 - Les matériaux constitutifs

Appareillage

On appelle **« appareillage »** ou **« opus »**, l'agencement des blocs dans le mur (Figure 28).

C'est en premier lieu le **type ou la forme des blocs** qui dicte le type d'appareillage utilisé. Cela peut également résulter d'un choix esthétique ou pratique du bâtisseur.

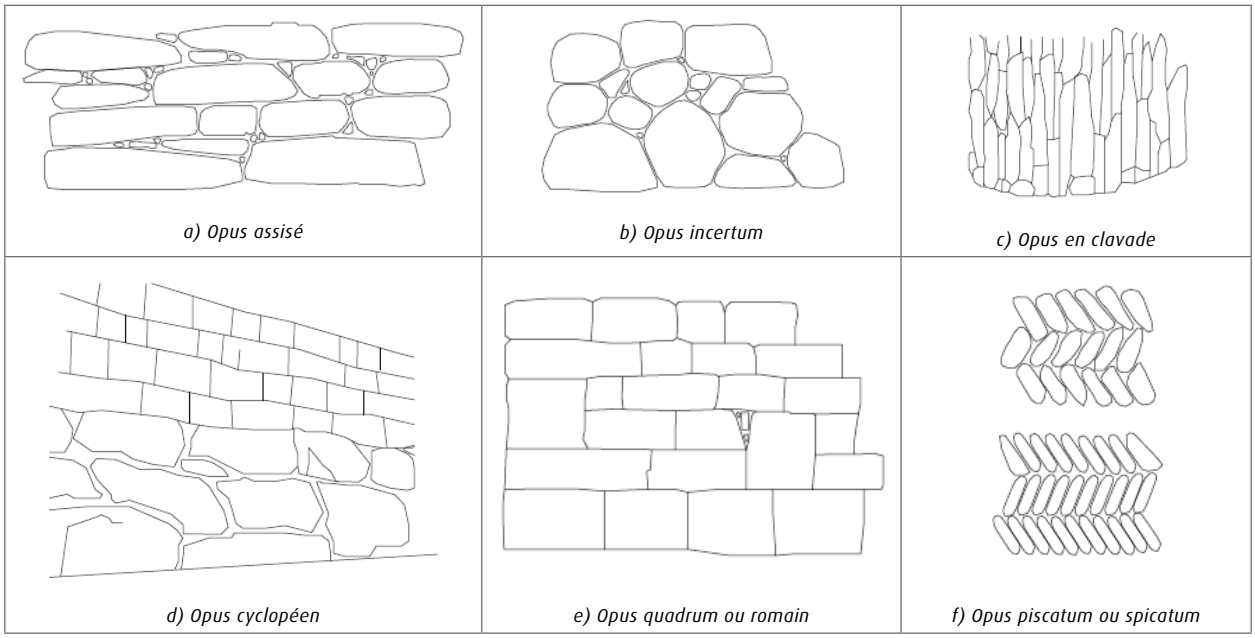
On trouve majoritairement deux grands types d'appareillage, souvent associés à l'influence géologique (le type de roche et son histoire géologique) :

- **Opus assisé** : opus aux assises régulières réalisé avec des pierres présentant des strates plus ou moins régulières (schistes, calcaires stratifiés) posées sur un lit horizontal parallèle aux strates ;
- **Opus incertum** : opus réalisé avec des pierres de dimension et de forme irrégulières (granites, grès, roches basaltiques).

Les autres types d'appareillages sont :

- **Opus en clavade** : opus aux assises régulières avec des pierres stratifiées posées sur un lit perpendiculaire aux strates (sur chant afin d'être moins sensible au colmatage par les fines) ; cet appareil est généralement utilisé pour l'aménagement des cours d'eau ou dans les zones où la pression hydrostatique est importante ;
- **Opus cyclopéen** : opus réalisé avec des pierres de très grandes dimensions ; cet appareil est généralement utilisé pour réaliser les bases des murs ;
- **Opus quadratum ou romain** : appareillage très régulier avec des pierres taillées « au carré », c'est-à-dire avec deux angles droits au retour de leur parement, et disposées en opus assisé le plus jointif possible ; si les lits sont irréguliers, il s'agit d'opus quadratum, et si les lits sont parfaitement nivelés et exactement de la même épaisseur, d'opus romain ;
- **Opus piscatum ou spicatum** : appareillage de pierres sur un plan oblique où le sens d'inclinaison de chaque lit est inversé par rapport au lit précédent :
  - s'il y a imbrication des lits entre eux, il s'agit d'opus spicatum,
  - si les lits ne sont pas reliés et présentent un contact linéaire bien marqué, on fait référence à l'opus piscatum.

Les quatre premiers sont généralement issus de l'influence géologique et les deux suivants sont le fruit de l'habilité et l'expression culturelle ou artistique d'esthétisme de leur bâtisseur [18].



a) Opus assisé — *b) Opus incertum* — *c) Opus en clavade*

d) Opus cyclopéen — *e) Opus quadrum ou romain* — *f) Opus piscatum ou spicatum*

Figure 28 : Différents types d'appareillage de pierres (pour a, b, c, e et f [18])

Les différents types de mortier en fonction du liant utilisé

- **les mortiers de chaux aériennes**, dit aussi **chaux grasses** (depuis l'époque romaine) ;
- **les mortiers de chaux hydrauliques** (à partir de 1818) ;
- **les mortiers de ciment de Portland** (à partir de 1850) ;
- **les mortiers « bâtard »**, constitués d'un mélange de ciment et chaux aérienne et/ou hydraulique (à partir de 1880).

Les chaux pour mortier

On distingue :

- **la chaux aérienne**[98] qui :
  - ne durcit qu'à l'air, de façon très lente[99] (plusieurs mois pour un mortier de hourdage rendant le mur sensible aux déformations),
  - est dite « dolomitique ou DL » ou « calcite ou CL » lorsque fabriquée à partir de calcaires coquillers,
  - est utilisée, mélangée au sable, comme mortier de hourdage ou d'enduits aériens,
  - se dissout dans les eaux pures[100] et acides.
- **la chaux hydraulique**[101] qui :
  - durcit dans l'air ou dans l'eau, de façon rapide (quelques heures),
  - possède une bonne résistance mécanique[102],
  - présente une bonne résistance à l'humidité,
  - est dite « chaux hydraulique naturelle – NHL », et « NHL –Z » lors d'ajout (jusqu'à 20% en masse) de matériaux hydrauliques ou pouzzolaniques adaptés, ou encore « chaux hydraulique – HL » lorsqu'il s'agit de ciments Portland artificiels auxquels sont ajoutés des fillers calcaires inertes.

98 La chaux aérienne est en fait de la « chaux grasse » ($Ca(OH)_2$) issue de chaux « vive » (obtenue par calcination du calcaire – carbonate de calcium CO_3Ca à 850°C), qui a été éteinte dans des bacs remplis d'eau où elle est stockée plusieurs jours (une part d'eau pour une part de chaux vive).

99 Par carbonatation de la chaux sous l'action du gaz carbonique.

100 Eaux de pluie et eaux granitiques.

101 La chaux hydraulique est produite par calcination de calcaires plus ou moins argileux ou siliceux (par cuisson à une température comprise entre 900 et 1500°C) avec réduction en poudre par extinction, avec ou sans broyage.

102 La présence d'argile (de 8 à 22%) dans le mélange donne aux chaux hydrauliques des propriétés proches de celles du ciment. La différence principale au niveau de la fabrication réside dans la température de cuisson (850°C pour les premières contre 1350°C pour le second) [17].

Les liants pour mortier de ciment

Les mortiers de ciment peuvent être constitués à partir de :

- **ciment[103] de Portland ;**
- **ciment au laitier.**

Ils font prise sous l'action de l'eau.

Annexe 2 – Les différentes sollicitations pour les murs de soutènement en maçonnerie

D'un point de vue cinématique, les murs-poids sont considérés comme monolithiques et répondent à la mécanique du solide rigide. Les méthodes de calcul des murs-poids reposent sur une analyse d'équilibre limite des forces s'exerçant sur le mur (Figure 29), à savoir :

- **P**, le poids propre du mur ;
- **F_a**, la poussée du remblai sur le mur ;
- **R**, la réaction de la fondation.

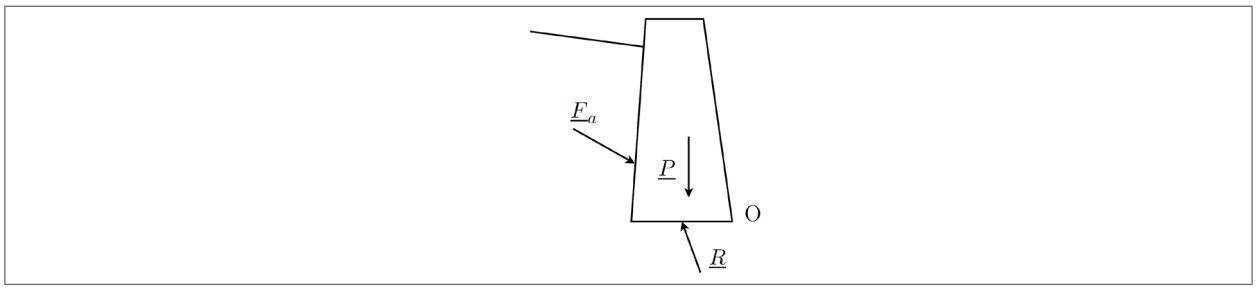


Figure 29 : Équilibre des forces sur un mur-poids : poids propre du mur P, poussée du remblai F_a et réaction de la fondation R

Stabilité au glissement

La sécurité au glissement sur la base assure que la composante horizontale des forces suivant la direction de glissement reste inférieure à la résistance limite due au frottement du sol de fondation sur la base d'assise du mur.
Soit « T » la composante tangente et « N » sa composante normale de la réaction de la fondation « R » à la base du mur.
Le **coefficient de sécurité au glissement « F_g »** est défini comme le rapport entre la force résistante de cisaillement et la composante tangentielle de la réaction exercée sur la base de sorte que :

$$F_g = \frac{N}{T} \tan \varphi$$

où φ est l'angle de frottement entre le sol de fondation et la base du mur.

Stabilité au renversement

La sécurité au renversement assure que le mur ne tourne pas autour de son arête inférieure à l'aval de la fondation.
Le **coefficient de sécurité au renversement « F_r »** est défini comme le rapport entre le moment en O des actions stabilisantes « M_s » et celui des actions renversantes « M_r » :

$$F_r = \frac{M_s}{M_r}$$

On peut également utiliser la **règle du tiers central** qui consiste à s'assurer que la réaction « R » reste dans le tiers central de la fondation. Notons que la règle du tiers central est plus sévère que le coefficient de sécurité au renversement.

---

103 Le ciment artificiel Portland est un liant hydraulique fabriqué par cuisson d'un mélange broyé (clinker) composé de calcaire (80%) et d'argile (20%). Il contient environ 60% de C3S (alite - $(CaO)_3(SiO_2)$), 20% de C2S (belite - $(CaO)_2(SiO_2)$),moins de 10% de C3A (aluminate - $(CaO)_3(Al_2O_3)$) et moins de 10% de C4AF (ferrite - $(CaO)_4(Al_2O_3)(Fe_2O_3)$) [17].

Stabilité au poinçonnement

La sécurité au poinçonnement assure que le sol de fondation du mur de soutènement résiste aux charges qui lui sont appliquées.
En pratique, on doit vérifier que la **contrainte normale appliquée au sol de fondation** (notée q_{ref}') reste inférieure à une fraction de la contrainte de rupture du sol (noté q_u') de sorte que :

$$q' \leq \frac{1}{\gamma_q}(q_u' - q_o')i_\delta + q_o'$$

où : q_u' est un coefficient de sécurité pris à 3 en service et à 2 à l'état limite ultime ;

q_0' est la contrainte verticale effective au niveau de la base de la fondation ;

i_δ est un coefficient minorateur tenant compte de l'inclinaison de la résultante et de la géométrie de la fondation.

Annexe 3 – Fiche d'évaluation du niveau de risque

Gestionnaire : ..... Date :.....

Voie de rattachement : ..... PR, abs :.....

Identifiant de l'ouvrage : .....

Lieu : .....

Aléas

Agressivité du milieu			Augmentation des sollicitations			Résistance géotechnique en pied défaillante		
(Tableau 2)		(Tableau 9)	(Tableau 3)		(Tableau 9)	(Tableau 4)		(Tableau 9)
a11		Total A1	a21		Total A2	a31		Total A3
a12			a22			a32		
a13		Niveau A1	a23			a33		Niveau A3
a14			a24					
(Seul Type 2 concerné)			a25		Niveau A2			
			a26					
			a27					
			a28					

Vulnérabilités

Agressivité du milieu			Augmentation des sollicitations			Résistance géotechnique en pied défaillante		
(Tableau 5)		(Tableau 10)	(Tableau 6)		(Tableau 10)	(Tableau 7)		(Tableau 10)
v11.1		Total V1	v21		Total V2	v31		Total V3
v11.2			v22			v32		
v12		Niveau V1	v23		Niveau V2	v33		Niveau V3
v13			v24			v34		
v14			(Seul Type 2 concerné)					

Gravité des conséquences (Tableau 8 et Tableau 15)

c1		Total C
c2		
c3		Niveau C
c4		

Niveau de criticité			Niveau de risque	
Pour chaque binôme « aléa-vulnérabilité »		Pour chaque scénario		Pour l'ouvrage
(Tableau 11)		(Tableau 12)	(Tableau 14)	(Tableau 15)
Agressivité du milieu		Ruine par rupture Interne (A1-V1 x A2-V2)		
A1 – V1				
Augmentation des sollicitations sur le mur				
A2 – V2		Ruine par rupture externe (A2-V2 x A3-V3)		
Résistance géotechnique en pied défaillante				
A3 – V3				

Notations et symboles utilisés

APROA	Avant-Projet de Réparation d'Ouvrage d'Art
CEI	Centres d'Entretien et d'Intervention des DIR
Cerema	Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
DDT(M)	Direction Départementale des Territoires (et de la Mer)
DIR	Direction Interdépartementale des Routes
DGITM	Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer
DOE	Dossier de l'Ouvrage Exécuté
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
IGN	Sigle associé notamment à l'Institut national de l'information géographique et forestière français (anciennement « Institut Géographique National »)
IFSTTAR	Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux, intégré depuis le 1er janvier 2020 à l'université Gustave Eiffel
IQOA	Image Qualité Ouvrage d'Art. C'est la méthodologie d'évaluation de l'état des ouvrages d'art du réseau routier national préconisée par l'ITSEOA. (§ 1.1)
ITSEOA	Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art (§ 1.1)
NE	Non évalué (IQOA)
PLU	Plan Local d'Urbanisme
PPRI	Plan de Prévention des Risques d'Inondation
ZAC	Zone d'Aménagement Concerté

Bibliographie

Guides techniques

[1] Maîtrise des risques - Application aux ouvrages d'art. Sétra, 2013, 92 p.

[2] Analyse des risques appliquée aux viaducs à travées indépendantes en poutres précontraintes (VIPP). Sétra, 2010.

[3] Analyse des risques appliquée aux ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie Terre armée®. Cerema, 2014.

[4] Analyse des risques appliquée aux buses métalliques. Cerema, 2015.

[5] Analyse des risques appliquée aux tranchées couvertes et aux tunnels creusés. Cerema, 2015.

[6] Analyse des risques appliquée aux murs de soutènement en béton armé sur semelle. Cerema, 2018.

[7] Analyse des risques des ouvrages en site affouillable. Cerema, 2019.

[8] Analyse des risques appliquée aux ponts en maçonnerie. Cerema, à paraître en 2021.

[9] ITSEOA (Instruction Technique de Surveillance et d'Entretien des Ouvrages d'Art) Fascicule 0 - Dispositions générales applicables à tous les ouvrages. Sétra, décembre 2010.

[10] IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) - Murs, Murs de soutènement. Guide méthodologique. Sétra, 2005.

[11] IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) - Murs, Murs de soutènement, Mur poids en maçonnerie, Types 1 et 2, Catalogue des désordres et procès verbal de visite. Cerema, 2018.

[12] IQOA (Image Qualité Ouvrages d'Art) - Murs, La quantification des désordres. Cerema, février 2018.

[13] ITSEOA (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art) Fascicule 51 - Ouvrages de soutènement. Sétra, 2010.

[14] ITSEOA (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art) Fascicule 2 - Généralités sur la surveillance. Sétra, décembre 2010, 60 p.

[15] ITSEOA (Instruction Technique pour la Surveillance et l'Entretien des Ouvrages d'Art) Fascicule 3 - Auscultation, surveillance renforcée, haute surveillance, mesures de sécurité immédiate ou de sauvegarde. Sétra, décembre 2010.

[16] Les ouvrages de soutènement - Guide de conception générale. Sétra, 1998, 154 p.

[17] Guide FABEM 6.1, Réparation et renforcement des maçonneries – Généralité et préparation des travaux, version 2, Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures. (STRRES), février 2016.

[18] Guide de bonnes pratiques de construction de murs de soutènement en pierre sèche. CAPEB, 2007, 157 p.

[19] Glossaire illustré sur les formes d'altération de la pierre, Comité scientifique international « Pierre » de l'ICOMOS (Internal Council on monuments and sites), 2008.

[20] D. Criado, C. Thibault, P. Marchand, D. Davi, « SISMUR, tool for evaluation of the seismic risks on the existing retaining walls ». Conférence ECEES Genève, Sept. 2006.

[21] Recommandations pour la durabilité des bétons durcis soumis au gel. Guide technique, Techniques et méthodes des laboratoires des ponts et chaussées. LCPC, décembre 2003, 167 p.

[22] Guide d'application de l'instruction technique pour la surveillance et l'entretien des ouvrages d'art - Fascicule 10 - Fondations en site aquatique. Sétra, Août 2013, 100p.

[23] IFSTTAR et Cerema, Auscultation des ouvrages d'art [En ligne]. Marne-la-Vallée : IFSTTAR, 2015 [consulté en juillet 2017]. Cahiers Interactifs, CII1. Disponible en ligne : http://www.ifsttar.fr/collections/CahiersInteractifs/CII1/.

[24] Pathologies des ouvrages portuaires : méthode d'investigation. CETMEF, septembre 2008, 88 p.

[25] Auscultation, surveillance et entretien des ouvrages maritimes - Fascicule 1 : les ouvrages en maçonnerie, Etat de l'art. CETMEF, février 2012, 133 p.

[26] Pathologies de gonflement des maçonneries en site maritime. Cerema 2018, Collection : Connaissances. ISBN : 978-2-37180-279-7.

[27] Guide FABEM 6.3, Réparation et renforcement des maçonneries - Réparation et renforcement structuraux. Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures (STRRES), février 2016.

[28] Guide FABEM 6.2, Réparation et renforcement des maçonneries - Réparation non-structurale, version 2. Syndicat national des entrepreneurs spécialistes de travaux de réparation et renforcement de structures (STRRES), février 2016.

[29] Les ponts en maçonnerie, Historique et constitution. Sétra, 156 p., juin 1982.

Normes

FD P18-011 Béton - Définition et classification des environnements chimiquement agressifs - Recommandations pour la formulation des bétons, mars 2016.

FD P18-326 Béton - Zones de gel en France, août 2016.

NF B10-601 Produits de carrière - Pierres naturelles - Prescriptions générales d'emploi des pierres naturelles, mars 2014.

NF EN 206/CN Béton - Spécification, performance, production et conformité - Complément national à la norme NF EN 206, décembre 2014.

NF P15-319 Liants hydrauliques - Ciments pour travaux en eaux à haute teneur en sulfates, 2014-01-25.

NF P15-317 Liants hydrauliques - Ciments pour travaux à la mer, 2006-09-01.

NF P95-107 Ouvrages d'art - Réparation et renforcement des maçonneries - Spécifications relatives aux techniques et aux matériaux utilisés, avril 2002.

Glossaire

Aléa : l'aléa est le phénomène à l'origine du risque, qui peut se produire ou non au cours de la vie de l'ouvrage.

Appareillage : disposition des pierres dans un mur, appelé aussi opus (*cf.* Annexe 1).

Capillarité : rattachée à la porosité, elle est l'aptitude de la pierre à absorber de l'eau. Les pierres qui absorbent beaucoup d'eau sont susceptibles de souffrir des cycles gel-dégel. En outre, elles nécessitent l'utilisation de mortiers humides, ce qui risque de perturber leur durcissement en pompant du fait de l'absorption de leur eau [29].

Conséquences : les conséquences comptabilisent les dommages directs sur les ouvrages (et les coûts de réparation associés) et les vies humaines.

Côté amont : côté du remblai.

Côté aval : côté du parement visible.

Criticité : la criticité est le croisement de l'aléa et de la vulnérabilité.

Fruit : angle (ou tangente à l'angle) que fait le parement d'un mur avec la verticale.

Haute surveillance : mesure d'exception qui consiste à surveiller en continu l'évolution d'un désordre et à déclencher des actions lors du dépassement de seuils prédéfinis et quantifiables faisant craindre la possibilité de défaillance à très court terme.

Opus : disposition des pierres dans un mur, appelé aussi appareillage (*cf.* Annexe 1).

Porosité : rapport du volume des vides sur le volume total (très variable pour la pierre en fonction de sa nature : de 0 à 50%) [27].

« Procédure plus longue » : afin de traiter rapidement un certain nombre d'ouvrage, cette méthode d'analyse des risques propose deux procédures, une rapide utilisant les informations immédiatement à disposition (par exemple les cotations IQOA), et la seconde « plus longue », nécessitant une nouvelle visite, une recherche d'information (par exemple sur des sites internet), la consultation du dossier d'ouvrage, s'il est disponible...

« Procédure rapide » : *cf.* « Procédure plus longue ».

Risque : le risque est le danger éventuel, plus ou moins prévisible, qui peut affecter l'ouvrage.

Surveillance renforcée : mesure de surveillance mise en œuvre lorsque l'état d'un ouvrage le justifie, ou en cas d'incertitude sur l'origine, la nature et la cause de désordres ou lorsque l'ouvrage a un caractère innovant ou exceptionnel.

Vulnérabilité : la vulnérabilité est la sensibilité d'un ouvrage vis-à-vis de l'aléa.

Notes :

© 2021 - Cerema

Le Cerema, l'expertise publique pour le développement et la cohésion des territoires.

Le Cerema est un établissement public qui apporte un appui scientifique et technique renforcé dans l'élaboration, la mise en oeuvre et l'évaluation des politiques publiques de l'aménagement et du développement durables. Centre de ressources et d'expertise, il a pour vocation de produire et de diffuser des connaissances et savoirs scientifiques et techniques ainsi que des solutions innovantes au coeur des projets territoriaux pour améliorer le cadre de vie des citoyens. Alliant à la fois expertise et transversalité, il met à disposition des méthodologies, outils et retours d'expérience auprès de tous les acteurs des territoires : collectivités territoriales, services de l'État et partenaires scientifiques, associations et particuliers, bureaux d'études et entreprises.

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du Cerema est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que se soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination et suivi d'édition › Cerema Infrastructures de transport et matériaux, Département de la valorisation technique, Pôle édition multimédia.

Mise en page › **Graph'Imprim : 9-11 rue Sinclair 94000 Créteil**

Illustration couverture › **© DIR Méditerranée**

Janvier 2021
ISBN : **978-2-37180-454-8**
ISSN : **2276-0164**
Gratuit

Éditions du Cerema
Cité des mobilités
25 avenue François Mitterrand
CS 92803
69674 Bron Cedex

Pour commander nos ouvrages › **www.cerema.fr**
Pour toute correspondance › **Cerema - Bureau de vente - 2 rue Antoine Charial - CS 33927 - 69426 Lyon Cedex 03**
ou par mail › **bventes@cerema.fr**

www.cerema.fr › Nos publications

La collection « Références » du Cerema

Cette collection regroupe l'ensemble des documents de référence portant sur l'état de l'art dans les domaines d'expertise du Cerema (recommandations méthodologiques, règles techniques, savoir-faire...), dans une version stabilisée et validée. Destinée à un public de généralistes et de spécialistes, sa rédaction pédagogique et concrète facilite l'appropriation et l'application des recommandations par le professionnel en situation opérationnelle.

Analyse des risques appliquée aux murs en maçonnerie

Le retour d'expérience sur les murs de soutènement en maçonnerie a montré que ces ouvrages peuvent se rompre sans signes avant-coureurs flagrants, alors que d'autres très déformés ne s'effondrent pas...
À la demande de la DGITM/DIT (Direction Générale des Infrastructures des Transports et de la Mer/Direction des Infrastructures de Transport), le réseau scientifique et technique du ministère a mis au point une méthodologie d'analyse des risques spécialement adaptée à ce type d'ouvrage. Cette méthode permet à un maître d'ouvrage d'analyser et de classer l'ensemble des murs de soutènement en maçonnerie en fonction des aléas auxquels ils sont soumis, de leur vulnérabilité et de la gravité des conséquences de leur défaillance potentielle.
L'objectif est aussi d'aboutir aux meilleurs arbitrages techniques et financiers compte tenu des enjeux socio-économiques et humains.

Sur le même thème

Analyse des risques appliquée aux viaducs à travées indépendantes en poutres précontraintes (VIPP) - Guide méthodologique, Sétra - 2010
Analyse des risques appliquée aux ouvrages en remblai renforcé relevant de la technologie Terre armée® - Guide méthodologique, Cerema - 2014
Analyse des risques appliquée aux buses métalliques - Guide méthodologique, Cerema - 2015
Analyse des risques appliquée aux tranchées couvertes et aux tunnels creusés - Guide méthodologique, Cerema - 2015
Analyse des risques appliquée aux murs de soutènement en béton armé sur semelle - Guide méthodologique, Cerema - 2018

Aménagement et cohésion des territoires - Ville et stratégies urbaines - Transition énergétique et climat - Environnement et ressources naturelles - Prévention des risques - Bien-être et réduction des nuisances - Mobilité et transport - Infrastructures de transport - Habitat et bâtiment

Gratuit
ISSN : 2276-0164
ISBN : 978-2-37180-454-8

Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement - www.cerema.fr
Infrastructures de transport et matériaux - 110 rue de Paris - 77171 Sourdun - Tél. +33 (0)1 60 52 31 31
Siège social : Cité des mobilités - 25, avenue François Mitterrand - CS 92 803 - F-69674 Bron Cedex - Tél. +33 (0)4 72 14 30 30